

УДК 621.791.011

Гулаков С. В., Бурлака В. В., Харланов О. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗБРЫЗГИВАНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ В СРЕДЕ CO₂

При сварке в среде углекислого газа остро стоит проблема разбрызгивания металла. Причины разбрызгивания металла в CO₂ описаны в ряде публикаций [1, 2]:

- нестабильный характер переноса металла, когда сила, отрывающая каплю от электрода, направлена в сторону от ванны, и капля выбрасывается за ее пределы;
- местное взрывообразное выделение газов в объеме металла, вызываемое металлургическими реакциями и приводящее к выбросу частиц металла из капель или, что бывает реже, из ванны;
- разрушение мостика жидкого металла, образующегося при переносе металла с короткими замыканиями в результате резкого увеличения плотности тока при сужении перемычки;
- недостаточная стабильность процесса сварки.

Капля может отделяться от торца электрода двумя вариантами: вытечь через нижнюю поверхность и полностью оторваться от торца электрода. Поэтому необходимо изучить процессы перехода капли с торца электрода в ванну при сварке в среде углекислого газа (CO₂).

Цель статьи является выбор более оптимальных параметров режимов переноса жидкого металла в расплавленную ванну при сварке в среде двуокиси углерода, и разработать новые технические средства, в том числе и программные средства, которые бы помогли реализовать контроль переноса металла.

Истечение жидкого металла с электрода может происходить по двум вариантам: отрывом капли по шейке и вытеканием через нижнюю поверхность струей.

Капля, висющая на торце электрода, удерживается в основном межфазными силами и силами поверхностного натяжения. Отрыв капли происходит при достижении ее веса, равного силе поверхностного натяжения:

$$2\pi \cdot r \cdot \sigma = m \cdot g, \quad (1)$$

где $2\pi \cdot r$ – периметр смачивания; σ – коэффициент поверхностного натяжения; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Поток электродного металла влияет на характер переноса тепла и формирование сварочной ванны. Представляет собой интерес анализ механизма переноса расплавленного электродного металла в ванну.

Обзор литературы показывает, что расчет сил поверхностного натяжения в основном производится с допущением того, что сила поверхностного натяжения не зависит от температуры. Но температура капли, с которой горит дуга, изменяется от температуры кипения в области активного пятна дуги до температуры плавления в зоне плавления электрода (на границе между электродом и каплей). В работе [3] показано, что капля формируется при изменении температуры вдоль её продольной оси под действием сил поверхностного натяжения. Но в данной работе не описываются влияние гравитационной и других сил, участвующих в формировании капли.

Проанализируем силы, действующие на каплю, которая меняет свои размеры за счет притока новых порций жидкости.

Отрыв капли от электрода может происходить вблизи межфазной поверхности по сечению шейки капли [3]. Следовательно, силы межфазного натяжения, удерживающие ее на торце, значительно выше сил поверхностного натяжения, поэтому они не влияют на характер переноса и в дальнейшем не учитываем их.

Полная поверхностная энергия для жидких поверхностей равна [3]:

$$U = \sigma - T(\partial\sigma/\partial T), \quad (2)$$

где $T(\partial\sigma/\partial T)$ – это скрытая теплота образования единицы площади поверхности, так называемая связанная энергия.

В необратимом изотермическом процессе $T(\partial\sigma/\partial T)$ при температуре T обычно отрицательная величина.

С увеличением размеров капли ее поверхность увеличивается за счет перевода молекул вещества в поверхностный слой из объема капли. При этом расходуется энергия на преодоление сил поверхностного натяжения.

Считаем в первом приближении, что форма капли есть сфера и поверхностное натяжение не зависит от формы и величины поверхности [4].

Получим выражение для критического диаметра капли, которая может удерживаться на торце электрода определенного сечения. Для этого подставим в формулу (1) вес капли, выраженный через ее плотность и объем:

$$d_k = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \sigma \cdot d_3}{4 \cdot \rho \cdot g}}, \quad (3)$$

где d_3 – диаметр электрода; ρ – плотность металла капли.

Подставив в формулу (3) различные значения d_3 , получим зависимости диаметра капли от диаметра электрода (табл. 1).

Из таблицы видно, что электрод диаметром 1 мм способен удержать каплю диаметром соответственно 4,5 мм, а электрод диаметром 10 мм – каплю 9,8 мм.

Формула (3) не учитывает гидростатическое давление, которое может создать в нижней части капли силы, превышает по модулю силы поверхностного натяжения. Это тем более вероятно, что температура в нижней части капли (в области активного пятна) выше температуры её у электрода, а в соответствии с зависимостью (1) поверхностное натяжение в нижней части капли также минимально. В этих условиях жидкий металл капли может вытечь через нижнюю поверхность, обладающую минимальным значением σ . Сопротивление вытеканию через нижнюю поверхность капли будет описываться формулой Лапласа и зависит от определенной величиной поверхностного натяжения и радиусов кривизны поверхности капли.

Механизм переноса может измениться и при меньших диаметрах капли. Это происходит за счёт динамических воздействий образованных внутри её потоков, электромагнитных сил, температурных градиентов, изменения диаметра электрода и других факторов. В работе [5] показано, что при переходе от крупнокапельного переноса к струйному с увеличением диаметра электрода от 1 до 3 мм наблюдается уменьшение плотности критического тока в 5 раз.

Кроме того, дуга, горящая между каплей и поверхностью металла, вызывает деформации поверхности капли. Это так же влияет на условия отрыва капли от торца электрода. Дуга давит на каплю и в области активного пятна она деформируется. В этом месте может появляться небольшое углубление (воронка) при захлопывании которой внутри капли может образоваться газовый пузырь. Кроме того, появление газовых пузырей в капле вызывает насыщение металла газами, вызывает кипение жидкого металла в области активного пятна.

Таблица 1

Зависимость диаметра капли от диаметра электрода

Диаметр электрода d_3 , мм	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр капли d_k , мм	3,9	4,5	5,85	6,2	7,1	7,8	8,1	8,5	9,0	9,5	9,8

На пузырь действует выталкивающая сила, которая перемещает его в верхнюю часть капли. В результате этого воздействия газовый пузырь переместится в верхнюю часть капли, к границе раздела фаз, и распределится по нижней поверхности торца электрода. Влияние газового пузыря на торце электрода на условия протекания тока по электроду изображено на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что наличие газового пузыря вызовет искажение силовых линий тока и увеличения его плотности в области перехода от электрода к капле. Из-за этого возникают электромагнитные силы, которые стремятся разорвать кольцевую перегородку и оторвать каплю от электрода. Кроме того, данное явление вызывает перегрев материала и взрыв перемычки. Получается разбрызгивание металла в процессе сварки.

Можно предположить влияние полярности питания дуги на условия насыщения капли газом. На прямой полярности ионизированные атомы газа в электрическом поле дуги перемещаются к электроду, где происходит их рекомбинация. Капли насыщаются газом и это вызывает увеличение их разбрызгивания.

Для исследования влияния полярности сварочного тока на образование газовых пузырей в капле проведены опыты. Произведена сварка в среде углекислого газа при различных полярностях сварочного тока и отобраны капли, застывшие на электроде в момент прекращения процесса сварки. Исследование срезов капель показало, что в каплях есть газовые пузыри (рис. 2). Исследования показали, что при сварке на обратной полярности в 40 % капель образовались незаполненные полости, тогда как при сварке при прямой полярности наличие пузырей газа обнаружено в 90 % рассмотренных капель.

Проведены исследования струйного и капельного переноса жидкости. Исследования проводились для воды, вытекающей из трубок различного диаметра с осевыми капиллярными отверстиями.

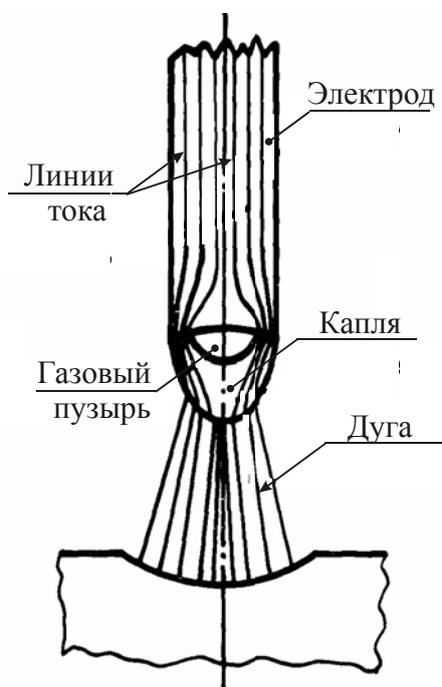


Рис. 1. Влияние газового пузыря на торце электрода на условия протекания тока по нему

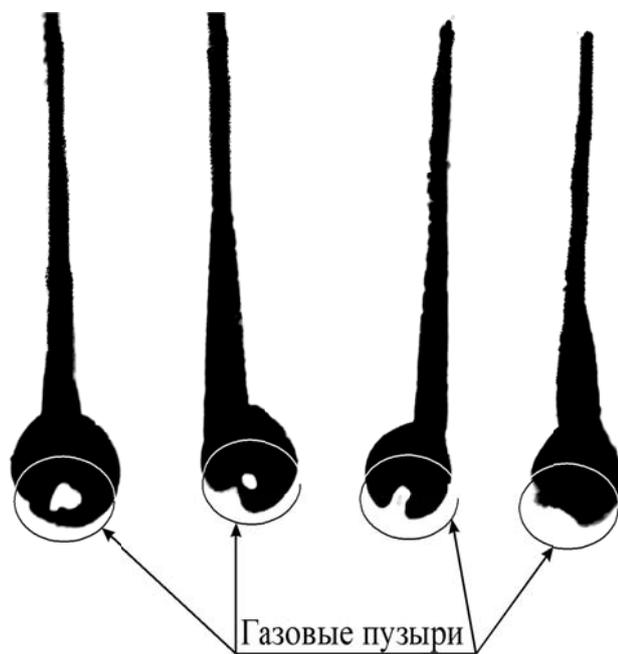


Рис. 2. Газовые пузыри в капле электродного металла

При малом диаметре трубки, равном 2–3 мм и небольшой скорости подачи воды в каплю наблюдается увеличение диаметра капли без искажения ее сферической формы до отрыва капли по шейке.

При увеличении выходного диаметра трубки до 6–8 мм наблюдается образование уже конусообразной капли. Возрастание силы гидростатического давления опережает возрастание сил, которые удерживают каплю за счет диаметра шейки. При определенном объеме капли жидкость из нее вытекает струей через нижнюю поверхность.

Дальнейшее увеличение скорости подачи воды в каплю приводит к деформации ее в направлении потока и отрыву капли докритических размеров.

Следовательно, увеличение скорости подачи жидкости исключает возможности каплеобразования и обеспечивает струйный перенос.

Давление дуги, действующее на каплю было промоделировано при помощи воздушной струи, направленной на каплю снизу. Исследования показали, что при диаметре воздушного сопла 3 мм струя воздуха делает небольшое углубление в капле. При этом система теряет устойчивость, капля отрывается при весе, меньше критического.

Если же уменьшить диаметр сопла до 1 мм и увеличить скорость потока воздуха, то можно увидеть локальную деформацию капли, образованию в ней пузырьков воздуха, которые всплывают и располагаются у среза трубки (рис. 3).

Из всего вышесказанного можно сделать вывод: одной из причин разбрызгивания металла является неконтролируемость поведения капли вследствие воздействия на нее ряда факторов в процессе сварочного процесса.

Чтобы избежать такого явления, необходимо полностью контролировать процесс сварки и параметры сварочного процесса при помощи аппаратных решений. Сварочные инверторы, реализующие такую технологию, в настоящее время выпускаются фирмой Lincoln Electric под торговой маркой STT (Surface Tension Transfer – перенос силами поверхностного натяжения). К их отличительным характеристикам следует отнести высокую динамику регулирования выходного тока (со скоростью изменения до 500 А/мс) и высокую стоимость.

Авторами начата разработка импульсного регулятора сварочного тока, который представляет собой высокочастотный понижающий DC/DC преобразователь, включаемый в разрыв между выходом стандартного источника питания с жесткой характеристикой и сварочной дугой. Силовая часть регулятора сварочного тока представлена на рис. 4.



Рис. 3. Воздушный пузырь в капле воды на срезе трубки тока

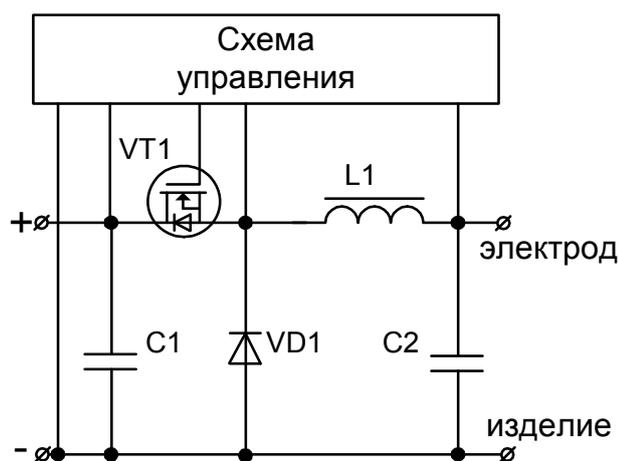


Рис. 4. Силовая часть регулятора сварочного тока

Силовая часть преобразователя выполнена с использованием двух параллельно соединенных силовых MOSFET транзисторов типа IRFS4010-7P и сборки диодов Шоттки 203CNQ100. Способ управления транзисторами – с обратной связью по току и постоянным

временем выключения. При этом верхняя граница частоты переключения составляет примерно 50 кГц. Управление затворами осуществляется посредством драйвера TC4429CPA, обеспечивающего импульсный выходной ток до 6 А. Выходной дроссель преобразователя содержит 23 витка на двух сложенных вместе сердечниках T184-52 из распыленного железа. Его расчетная индуктивность составляет около 14 мкГн при токе 250 А.

Обработка сигналов обратных связей и формирование сигналов управления производится с помощью однокристального микроконтроллера ATmega48, работающего с тактовой частотой 20 МГц. Контроллер «отслеживает» состояние дугового промежутка путем измерения напряжения на выходе регулятора (конденсаторе C2) и по заданной программе формирует задание на выходной (сварочный) ток.

Такой способ позволяет снизить себестоимость устройства, однако его недостатком является достаточно сильная температурная зависимость. Указанный недостаток может быть устранен путем введения температурной коррекции, например, с помощью применения контроллера Atmega48PA, имеющего встроенный датчик температуры, и обеспечения его теплового контакта с силовыми транзисторами.

Питание цепей управления отдельное и осуществляется от вспомогательного высокочастотного источника питания на специализированной микросхеме TNY255P.

Устройство позволит производить сварку с базовым током до 100–120 А и наложением импульсов до 250 А. Среднее рабочее выходное напряжение может регулироваться в диапазоне до 40 В, напряжение холостого хода – до 70 В.

Отличительными особенностями разрабатываемого преобразователя являются низкая себестоимость и возможность управления процессом сварки с обеспечением его высокого качества.

ВЫВОДЫ

1. Выведена формула, показывающая зависимость диаметра капли на торце электрода от диаметра электрода.
2. Показан процесс образования газового пузыря в капле металла на торце электрода. Наличие газовых пузырей приводит к увеличению разбрызгивания при сварке. Исследованы факторы, влияющие на образование газовых пузырей при сварке.
3. Проведены исследования струйного и капельного переноса жидкости. Исследования проводились для воды, вытекающей из трубок различного диаметра.
4. Для контроля параметров сварочного процесса ведется разработка импульсного регулятора сварочного тока, который позволит снизить разбрызгивание металла при сварке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заруба И. И. *Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла* / И. И. Заруба // *Автоматическая сварка*. – 1970. – № 3.
2. Заруба И. И. *Механизм разбрызгивания металла при дуговой сварке* / И. И. Заруба // *Автоматическая сварка*. – 1970. – № 10.
3. Симоник А. Г. *Роль поверхностного натяжения в отрыве капель электродного металла при струйном переносе* // *Сварочное производство*. – 1985. – № 1. – С. 36–39.
4. *Физический энциклопедический словарь*. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – 988 с.
5. Ерохин А. А. *Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности* / А. А. Ерохин – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.