

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ (Обзор)

И. И. ЗАРУБА, д-р техн. наук, **В. В. АНДРЕЕВ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

В. И. СТЕПАХНО, д-р физ.-мат. наук, **В. А. КОРИЦКИЙ**, канд. техн. наук
(ОЗСО Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлена информация о современных способах управления током короткого замыкания в переходных процессах, вызванных переносом электродного металла при механизированной сварке в углекислом газе.

Ключевые слова: механизированная дуговая сварка, плавящийся электрод, сварочный ток, постоянный ток, сварочный дроссель

При механизированной дуговой сварке в углекислом газе с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка ток короткого замыкания $I_{к.з}$ можно ограничивать дросселем или резистором в цепи постоянного тока при жесткой или пологопадающей вольт-амперной характеристике сварочного источника питания, либо путем использования в сварочном выпрямителе силового трансформатора с развитым рассеянием [1, 2]. При этом форма кривой $I_{к.з}$ зависит от способа его ограничения (рис. 1).

В свое время на основе безынерционного ограничения $I_{к.з}$ резистором создали простую систему многопостового питания [3]. По сравнению с инерционным ограничением $I_{к.з}$, например дросселем, безынерционный способ облегчает первоначальное возбуждение дуги, что особенно важно при сварке электродной проволокой диаметром 2 мм и более.

Способы ограничения $I_{к.з}$ при сварке в углекислом газе в нижнем положении описаны в работе [4]. При сварке в углекислом газе вертикальных и потолочных швов различие в способах ограничения $I_{к.з}$ особенно заметно. Установлено, что чем меньше амплитудное значение $I_{к.з}$, тем меньше разбрызгивание металла. При сварке в нижнем положении минимальная амплитуда $I_{к.з}$ ограничивается только условием устойчивости процесса [5].

При сварке в вертикальном и потолочном положениях значение $I_{к.з}$ выбирают исходя прежде всего из условия переноса металла и формирования шва. Чем выше амплитудное значение $I_{к.з}$ (до определенного предела), тем больший импульс по направлению к изделию получают капля элект-

родного металла и ванна, что способствует удержанию их на вертикальной и потолочной поверхностях. Обнаруживается явное противоречие между требованиями уменьшения разбрызгивания (минимальный $I_{к.з}$) и обеспечения формирования вертикального и потолочного швов (максимальный $I_{к.з}$).

Сварщики часто пренебрегают разбрызгиванием и работают при больших амплитудных значениях $I_{к.з}$. В этом случае, как показала практика, лучших результатов достигают при способе инер-

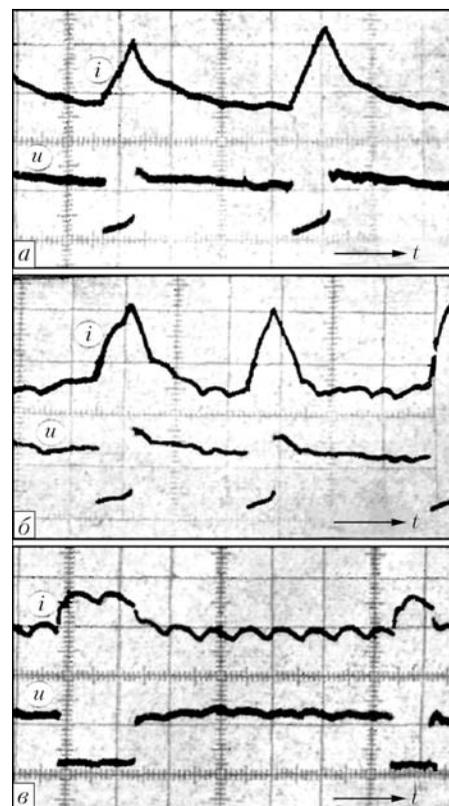


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения при ограничении тока короткого замыкания дросселем (а), наклоном внешней характеристики сварочного выпрямителя, трансформатор которого имеет развитое рассеяние (б) и резистором (в) [2]

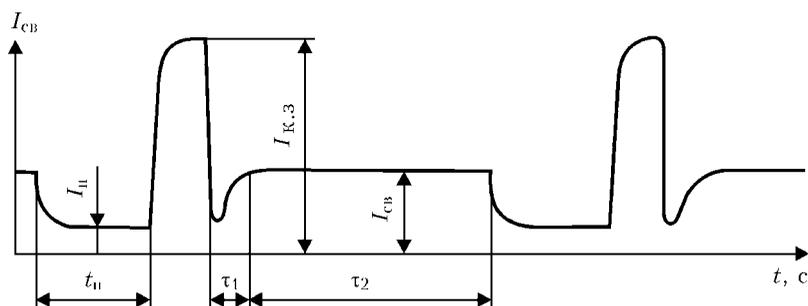


Рис. 2. Осциллограмма тока при сварке с короткими замыканиями с использованием тиристорного ключа; τ_1 — длительность паузы в протекании сварочного тока к моменту разрыва переключки; τ_2 — длительность плавления электрода; $t_{п}$ — длительность паузы перед коротким замыканием

ционного ограничения $I_{к.з}$. В случае безынерционного ограничения тока балластным реостатом размер капель увеличивается, что затрудняет их перенос в ванну и формирование шва.

Капли, как правило, смещаются на боковую поверхность электрода, поскольку при их первоначальном соприкосновении с ванной, когда площадь контакта меньше сечения шейки между электродом и каплей, электродинамическая сила направлена от ванны к электроду и препятствует переносу капли. Основная их масса отталкивается от ванны, однако не теряет связи с электродом и, пополняясь новыми порциями жидкого металла, увеличивается в размерах. Последующие соприкосновения сопровождаются такими же явлениями, пока капля, приведенная толчками электродинамической силы в интенсивное колебательное движение, не оторвется от электрода и улетит в сторону либо не столкнется с ванной большей частью своей поверхности и поглотится последней, что при сварке вертикальных швов бывает реже.

В нижнем положении образование большой капли не отражается на формировании шва, поскольку гравитационная сила способствует ее продвижению на торец электрода и в большинстве случаев — в ванну. Для уменьшения электродинамической силы, отталкивающей каплю от ванны в первый момент их соприкосновения, необходимо снизить $I_{к.з}$. Однако значение $I_{к.з}$ должно быть достаточным для создания соответствующего импульса, прижимающего после этого каплю к ванне. Указанные требования не удовлетворяются при ограничении $I_{к.з}$ балластным реостатом.

Для поисков оптимальных решений в 1985 г. сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона и Томского политехнического института провели эксперименты с использованием тиристорного ключа [6] и предложили способ сварки с короткими замыканиями дугового промежутка, суть которого заключается в управлении током в переходных процессах, вызванных переносом металла (рис. 2).

При сварке от источника питания постоянного тока, содержащего в сварочной цепи дроссель, перед коротким замыканием дугового промежутка производят кратковременное снижение тока на период $t_{п}$. В момент начала короткого замыкания дроссель шунтируют резистором, что приводит к резкому росту тока от минимального до пикового

значения. Резкое повышение тока короткого замыкания способствует увеличению электродинамической силы, направленной от электрода к сварочной ванне и стремящейся ускорить переход электродного металла в сварочную ванну за счет действия сил пинч-эффекта по линии расплавления электрода. Это вызывает сокращение длительности короткого замыкания от $(4...5) \cdot 10^{-3}$ с (средняя длительность короткого замыкания при наличии в сварочной цепи дросселя) до $(1,5...2,0) \cdot 10^{-3}$ с.

При достижении критических размеров переключки между сварочной ванной и нерасплавленной частью электрода ($U_{д} = 6...8$ В) сварочный ток резко снижается до значения $20...40$ А при длительности $(0,2...0,4) \cdot 10^{-3}$ с (рис. 2, τ_1). По истечении длительности паузы τ_1 сварочный ток вновь увеличивают. При этом в цепь протекания тока опять включают дроссель, наличие которого повышает эластичность дуги и устойчивость ее горения на интервале плавления электрода τ_2 и снижения тока перед коротким замыканием $t_{п}$ (рис. 2).

Создание таких условий приводит к значительному уменьшению дугового промежутка и размера капли металла, переносимого в ванну. Сокращение длительности короткого замыкания позволяет при незначительном напряжении холостого хода $U_{х.х}$ увеличить подачу электродной проволоки и соответственно производительность процесса сварки при высокой его стабильности.

Рассмотренный способ дуговой сварки получил развитие в середине 1990-х гг. в разработанном компанией «Lincoln Electric» процессе STT (Surface Tension Transfer) для сварки корневых швов [6].

Процесс STT — преемник обычного процесса механизированной сварки в защитном газе, реализующего перенос металла посредством коротких замыканий дугового промежутка. Однако STT принципиально отличается от него возможностью прямого управления условиями переноса электродного металла в сварочную ванну, что обеспечивается за счет быстродействующей инверторной схемы источника питания, специального электронного микропроцессорного модуля, принудительно задающего необходимый уровень сварочного тока, а также контура обратной связи, динамично отслеживающего изменения напряжения

на дуге. В течение всего цикла переноса капли в сварочную ванну значения сварочного тока жестко зависят от фазы формирования капли и последующего ее перехода в ванну. Идентификация фазы переноса осуществляется путем обработки уровня напряжения, постоянно снимаемого с дугового промежутка.

Компанией «Lincoln Electric» специально для этого процесса разработан 225-амперный инверторный источник питания Invertex STT II [7], реализующий технологию управления формой сварочного тока. Invertex STT II отличается от обычных сварочных источников, поскольку не является источником ни с жесткой, ни с крутопадающей характеристикой. Аппарат имеет обратную связь, отслеживающую основные этапы переноса капли и мгновенно реагирующую на процессы, происходящие между электродом и сварочной ванной, изменяя значение и форму сварочного тока.

Следует отметить, что оборудование для ведения процесса STT относится к довольно дорогостоящему, для которого требуется создание соответствующих условий эксплуатации. То же касается и процесса с минимальной теплоотдачей СМТ (Cold Metal Transfer – перенос холодного металла), разработанного фирмой «Fronius» [8]. Процесс переноса металла происходит за счет реверса подачи электродной проволоки в момент возникновения короткого замыкания, что помогает отделению капли. При этом ток короткого замыкания незначителен, что обеспечивает перенос металла с минимальным разбрызгиванием.

В настоящее время данную технологию используют в тех случаях, когда требуется пониженное, гибко регулируемое тепловложение. За счет очень высокой производительности процесса сварки можно заполнять более широкие зазоры при работе с тонкими и ультратонкими листами. Низкий процент перемешивания с основным металлом создает новые возможности и особые преимущества.

Основные особенности процесса заключаются в следующем:

- регулирование короткой дуги исключительно в источнике питания;
- новая динамичная инвертирующая схема;
- очень быстрое цифровое регулирование процесса;
- значительное снижение пика мощности при повторном зажигании дуги;
- существенное уменьшение теплопередачи на этапе расплавления.

Ускорение переноса капли в ванну путем принудительного выключения тока в цепи на первой и последней фазах короткого замыкания позволяет повысить производительность процесса. Однако практическое применение ключевых элементов в установках для механизированной сварки пока затруднено из-за сложности устройств и вы-

сокой стоимости основных элементов схемы. Поэтому более предпочтительными следует считать сравнительно недорогие устройства, например сварочные дроссели, которыми комплектуются серийные выпрямители для механизированной сварки и наплавки. Проведенные нами исследования показали, что аналогичных результатов можно достичь без сложных систем введения обратных связей.

Нами обращено внимание на влияние накопленной в дросселе и в сварочном контуре энергии при коротком замыкании дугового промежутка на последующие после него возбуждение дуги и интенсивность плавления электрода. Как оказалось, принудительное управление этой энергией с помощью внутренней обратной связи позволяет получать положительные результаты по качеству формирования шва и потерям металла. Достаточно управлять энергией дросселя таким образом, чтобы после короткого замыкания минимизировать длину дуги, а значит, и размер капель электродного металла.

При сварке в углекислом газе с короткими замыканиями разбрызгивание металла в некоторой степени зависит от напряжения дуги, поскольку размер капли и энергия взрыва переключки пропорциональны длине дугового промежутка [9]. Поэтому естественное в этом случае стремление вести сварку на режимах с малым напряжением дуги не всегда технологически оправдано. Как показали наблюдения, при ограничении тока короткого замыкания дросселем запасенная в нем на растущем участке переходного процесса электромагнитная энергия после разрыва переключки обуславливает резкое увеличение дугового промежутка за счет интенсивного плавления электрода, что видно на типичных осциллограммах напряжения дуги. Нами исследовалась возможность управления и стабилизации длины дугового промежутка путем дозирования поступающей в дугу энергии после короткого замыкания. С этой целью разработали и испытали специальный дроссель, электрическая схема которого показана на рис. 3 [10].

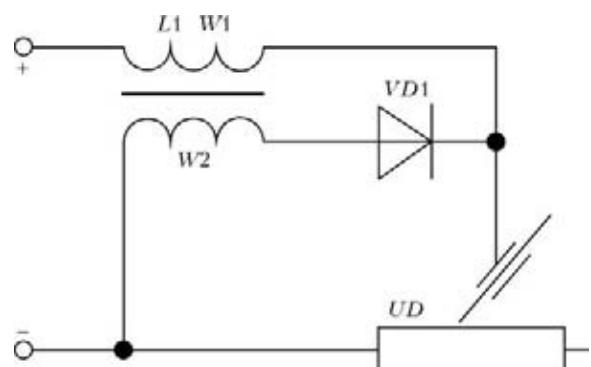


Рис. 3. Электрическая схема дросселя с диодом в цепи обмотки управления

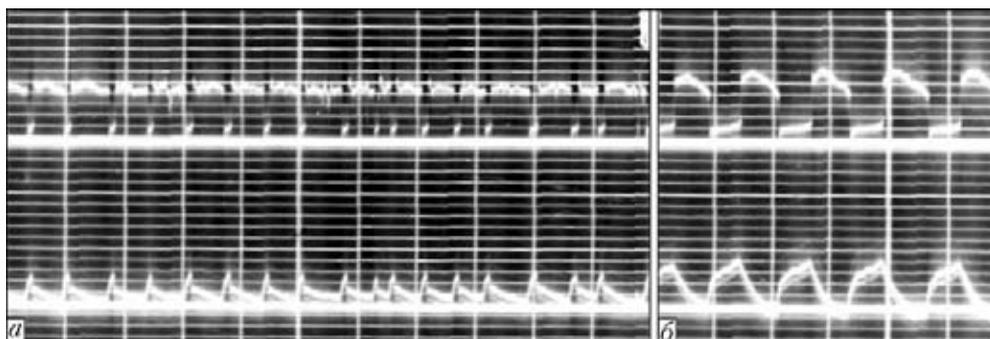


Рис. 4. Осциллограммы напряжения дуги и тока сварки ($U_d = 20$ В, $I_{св} = 100$ А, $U_{х.х} = 26$ В, $D_{э.п} = 1,2$ мм): а — дроссель с внутренней обратной связью; б — дроссель без внутренней обратной связи

Дроссель $L1$ содержит силовую обмотку $W1$, включенную последовательно в сварочную цепь, вспомогательную обмотку $W2$, магнитопровод, диод $VD1$ в цепи вспомогательной обмотки, причем диод с помощью катода подключен к электроду, если сварку ведут на токе при обратной полярности, а конец обмотки $W2$ подключен к изделию. При сварке на токе при прямой полярности включение диода изменяется.

Устройство работает в переходных режимах, вызываемых замыканиями дугового промежутка каплями расплавленного металла. При нарастании тока в силовой обмотке дросселя происходит нарастание тока во вспомогательной обмотке, который суммируется с основным током. Резкий спад сварочного тока после разрыва жидкой перемычки между электродом и ванной обуславливается изменением результирующего магнитного потока дросселя на стадии нарастания сварочного тока, а также значения индуктивности дросселя.

При этом достигается более резкое кратковременное увеличение тока в период короткого замыкания, способствующее активному сжатию перемычки расплавленного металла электрода и ее разрушению. Одновременно отмечено существенное уменьшение длительности коротких замыканий и увеличение их частоты (рис. 4). Перенос металла становится мелкокапельным. Резкое сни-

жение тока после короткого замыкания обеспечивает минимальную длину дугового промежутка.

Подобными дросселями в настоящее время комплектуются сварочные выпрямители ВС-650СР, выпускаемые ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона [11]. В отличие от традиционных сварочных выпрямителей источник, благодаря оригинальному дросселю с внутренней обратной связью, обеспечивает стабилизацию длины дугового промежутка и размера капель переносимого металла при сварке в защитных газах с короткими замыканиями, что существенно улучшает формирование шва и качество сварки во всех пространственных положениях при минимальном разбрызгивании электродного металла (рис. 5).

Нами разработаны также варианты схемных решений устройства с тиристором в цепи обмотки управления [12]. Применение тиристорного управления в дросселе позволяет существенно уменьшить скорость нарастания тока в начале короткого замыкания, что обеспечивает надежное слияние капли с ванной расплавленного металла. Максимальное значение тока короткого замыкания благодаря тиристорному регулированию может быть в определенной мере оптимизировано и выбрано таким, чтобы обеспечить надежное разрушение жидкой перемычки между каплями и электродом, а также переход капли в ванну.



Рис. 5. Внешний вид наплавленных валиков при сварке в углекислом газе от выпрямителя с дросселем с внутренней обратной связью

Одновременно такое регулирование может уменьшить максимальное значение тока короткого замыкания, что ограничивает энергию взрыва жидкой перемычки и уменьшает вероятность выброса капли за пределы сварочной ванны. Все это способствует уменьшению коэффициента разбрызгивания металла. Ускоренное снижение сварочного тока после окончания короткого замыкания уменьшает перегрев металла и выгорание легирующих элементов, что в ряде случаев имеет важнейшее технологическое значение. Включение источника низкого постоянного напряжения последовательно с обмоткой управления дросселя и тиристором значительно расширяет возможности управления энергии сварочного дросселя в переходных процессах за счет регулирования уровня и формы тока короткого замыкания.

Таким образом, модернизация дросселей серийных сварочных выпрямителей путем снабжения их специальной дополнительной обмоткой внутренней обратной связи позволяет получить технологический эффект, сравнимый с таковым при сварке с использованием дорогостоящего оборудования.

Основными достоинствами устройства являются простота, направленное использование запасенной дросселем электромагнитной энергии и повышение качества сварки. Сварка с применением внутренней обратной связи в дросселе позволяет получить мелкокапельный перенос электродного металла при малых его потерях на угар и разбрызгивание; снижение выгорания легирующих элементов и окисления электродного металла вследствие уменьшения времени пребывания расплавленной капли металла в зоне дуги; повышение стабильности процесса сварки и устойчивости горения дуги; саморегулирование

уровня $I_{к.з}$, уменьшение длительности $I_{к.з}$, увеличение частоты $I_{к.з}$; качественную сварку во всех пространственных положениях шва.

1. Заруба И. И., Андреев В. В. Особенности применяемых способов ограничения тока короткого замыкания при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1978. — № 1. — С. 16–19.
2. Влияние метода ограничения тока короткого замыкания на формирование вертикальных и потолочных швов при сварке в углекислом газе / И. И. Заруба, В. П. Баргамен, В. В. Андреев, М. Н. Сидоренко // Там же. — 1973. — № 4. — С. 64–67.
3. Лебедев В. К., Медведев Н. Ф., Заруба И. И. Исследование многопостовых систем питания для сварки в углекислом газе // Там же. — 1967. — № 10. — С. 40–44.
4. Заруба И. И. Механизм разбрызгивания металла при дуговой сварке // Там же. — 1970. — № 11. — С. 12–16.
5. Заруба И. И. Условие устойчивости процесса сварки с короткими замыканиями // Там же. — 1971. — № 2. — С. 1–4.
6. А. с. 1310140 СССР, МПК В 23 К 9/00. Способ дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и устройство для его осуществления / И. И. Заруба, Ю. Н. Сараев, А. Ф. Князьков, А. К. Тимошенко. — Оpubл. 15.05.87; Бюл. № 18.
7. Иоффе Ю. Е., Квасов Ф. В. Новые высокотехнологичные системы полуавтоматической сварки компании «Линкольн Электрик» // Свароч. пр-во. — 1997. — № 4. — С. 40–43.
8. Лебедев В. А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла (Обзор) // Автомат. сварка. — 2010. — № 10. — С. 45–53.
9. Заруба И. И. Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла // Там же. — 1970. — № 3. — С. 14–18.
10. А. с. 694308 СССР, МПК В 23 К 9/00. Сварочный дроссель / В. К. Лебедев, И. И. Заруба, В. В. Андреев и др. — Оpubл. 30.10.79; Бюл. № 40 10.
11. Степахо В. И., Андреев В. В., Корицкий В. А. Источники питания для дуговой сварки и наплавки с улучшенными эксплуатационными характеристиками // Вагон. парк. — 2011. — № 5. — С. 26–30.
12. А. с. 1087282 СССР, МПК В 23 К 9/00. Устройство для стабилизации сварочного тока при сварке постоянным током с периодическими короткими замыканиями / И. И. Заруба, В. В. Андреев, Г. Н. Москвич и др. — Оpubл. 23.04.84; Бюл. № 15.

Information on modern methods of controlling short-circuiting current in the transient processes caused by electrode metal transfer in mechanized CO₂ welding is presented.

Поступила в редакцию 04.08.2011