



УДК 621.791.754:661.9

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В CO_2 С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ ДУГОВОГО ПРОМЕЖУТКА (Обзор)

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведен обзор публикаций по автоматическому управлению процессом сварки в CO_2 с короткими замыканиями дугового промежутка, а также алгоритмы управления на каждом этапе цикла сварки.

Ключевые слова: сварка в CO_2 , короткие замыкания, автоматическое управление, саморегулирование, стабильность процесса, разбрызгивание, перенос капель, импульс тока

Основным механизированным способом сварки является полуавтоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах. В качестве последнего благодаря своей дешевизне широкое распространение получил углекислый газ. При малом токе и падении напряжения на дуге сварка в CO_2 происходит с периодическими короткими замыканиями (КЗ) дугового промежутка, во время которых переносится расплавленный металл электрода в сварочную ванну. Благодаря малому тепловложению, контактному массопереносу, малым размерам капель и ванны такой процесс получил широкое применение при сварке металла малых толщин во всех пространственных положениях, а также средней и большой толщины в положении, отличном от нижнего. Для сварки в CO_2 применяются простейшие выпрямители с пологопадающей внешней характеристикой и последовательно включенным в сварочную цепь дросселем. Пологопадающая характеристика выпрямителя обуславливает саморегулирование дуги, а дроссель ограничивает скорость нарастания тока во время КЗ. Типичные осциллограммы тока и напряжения (рис. 1) имеют пульсирующий характер. Энергия, накопленная в дросселе во время КЗ, расходуется на плавление электрода при горении дуги. В качестве регулируемых параметров используются напряжение холостого хода выпрямителя, скорость подачи плавящегося электрода и индуктивность дросселя. Однако, помимо преимуществ, процесс сварки имеет и существенные недостатки. Из-за КЗ дугового промежутка происходит значительное разбрызгивание металла, а низкое тепловложение характеризуется малой проплавливающей способностью.

Для устранения недостатков сварки в CO_2 с КЗ в последние десятилетия предприняты значительные усилия. В первую очередь они касаются создания нового класса импульсных источников питания, характеризующихся повышенным быстродействием и снабженных системами управления формой тока и напряжения в течение каждого цикла формирования и переноса капли в соответствии с информацией, получаемой от процесса. Такие источники почти в 2 раза дороже традиционных, но обеспечивают качество сварки, сравнимое со сваркой в аргоне.

К настоящему времени сложилось представление об «идеальном» цикле сварки (рис. 2), который должен обеспечиваться системой автоматического управления. На разных этапах цикла требуются различные алгоритмы управления.

Основными задачами систем управления для сварки в CO_2 с КЗ дугового промежутка являются: уменьшение разбрызгивания металла более чем в 2 раза; повышение стабильности процесса сварки; компенсация возмущений, действующих на процесс сварки.

Управление в начальный момент КЗ дугового промежутка. В начальной стадии КЗ (рис. 2) t_0 наименьший радиус образующейся перемычки жидкого металла находится в месте контакта кап-

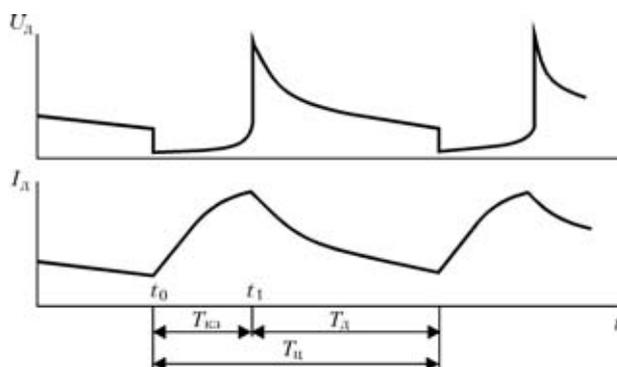


Рис. 1. Характерные осциллограммы напряжения и тока при сварке в CO_2

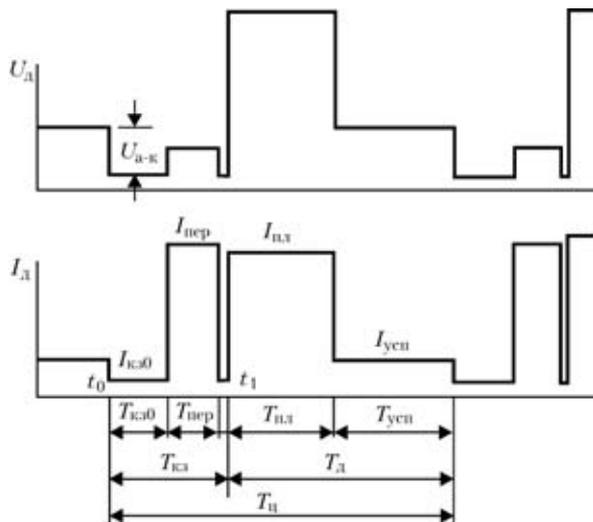


Рис. 2. «Идеальный» цикл сварки в CO_2

ли с ванной. Электродинамические силы протекающего через перемычку тока препятствуют переходу капли в ванну под действием сил поверхностного натяжения. Более того, они могут даже вызвать отброс капли от поверхности ванны, а проходящий ток — перегрев и взрыв формирующейся перемычки. При этом, как показывает скоростная киносъемка [1], капля, отрываясь от электрода, улетает в виде брызги либо остается на торце электрода и переходит в ванну при одном из следующих КЗ. Из теоретического анализа следует, что вероятность отброса капли тем выше, чем меньше ее радиус и больше ток [2].

Для уменьшения разбрызгивания при касании капли поверхности сварочной ванны и увеличения стабильности процесса сварки ток сварки снижают перед КЗ дугового промежутка или сразу после его возникновения. Сигналом начала КЗ служит резкое снижение напряжения на дуге на сумму анодного и катодного падения напряжения, которое для сварки в CO_2 составляет $U_{a-k} = 19...20$ В [3]. Изменение напряжения на дуге при КЗ происходит очень быстро — за $20 \cdot 10^{-9}$ с [4].

Первым идею ограничения тока КЗ в 1970 г. реализовал И. И. Заруба [5] и в дальнейшем неоднократно к ней возвращался [1]. В работе [6] базовый ток дуги и ток КЗ устанавливали на очень малом уровне (6...12 А) таким образом, что переход капли в основном происходил под действием сил поверхностного натяжения. Плавление электрода проводилось под действием короткого сильноточного импульса.

Кратковременное снижение тока в начале КЗ в 1980 г. первыми осуществили авторы работы [7] (рис. 3). По их данным, снижение тока до 2...10 А на период 0,7–1 мс в начале каждого КЗ позволяет практически устранить кратковременные КЗ и в 2–3 раза повысить стабильность процесса, оцениваемую по коэффициенту вари-

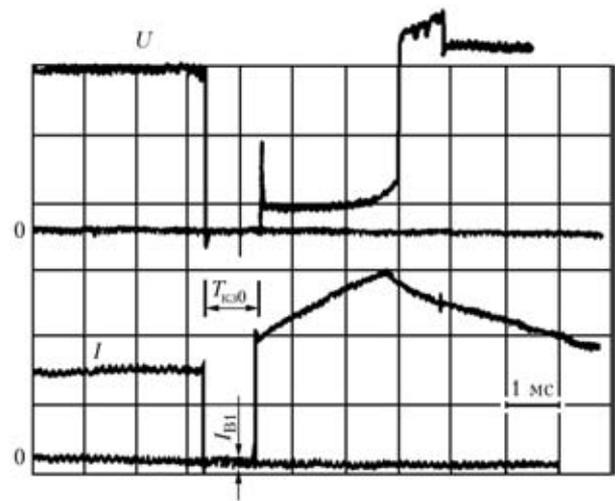


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока при сварке в CO_2 с коммутацией тока в начале КЗ [7]

ации длительности КЗ. В дальнейшем этот алгоритм применяли различные исследователи без каких-либо изменений [8–17], отличие заключается только в аппаратуре, реализующей его. В начале использовали тиристоры, шунтирующие сварочную горелку, или последовательно включенный резистор. В настоящее время обходятся высоким быстродействием транзисторного инверторного источника питания либо используют вместо тиристора транзистор, шунтирующий последовательно включенный в сварочную цепь резистор.

Управление переносом металла на стадии КЗ. Металл капли достаточно больших размеров (по сравнению с диаметром электрода) может переноситься в сварочную ванну даже без тока — только под действием сил поверхностного натяжения. По оценкам авторов работы [6], критические высота и диаметр капли соответственно составляют $1,2d_{эл}$ и $1,4d_{эл}$ (авторы практически реализовали такой процесс при сварке в CO_2). В работе [18] критическая высота перемычки оценивается как $1,4d_{эл}$.

Для уменьшения времени КЗ и гарантированного разрыва перемычки через нее пропускают ток, взаимодействие которого с собственным магнитным полем вызывает силу, направленную внутрь к оси перемычки. Эта сила, пропорциональная квадрату плотности тока в данном сечении, способствует уменьшению диаметра перемычки. Если форма последней отлична от цилиндрической, то, помимо радиальных, возникают аксиальные усилия, вызывающие течение металла в сторону от меньшего диаметра к большему и приводящие к уменьшению диаметра самого узкого места в перемычке (пинч-эффект).

Существенное значение имеет время приложения импульса тока после начала КЗ. На первом этапе наименьший диаметр жидкой перемычки находится вблизи контакта со сварочной ванной. В этом случае пинч-эффект вреден, так как замед-

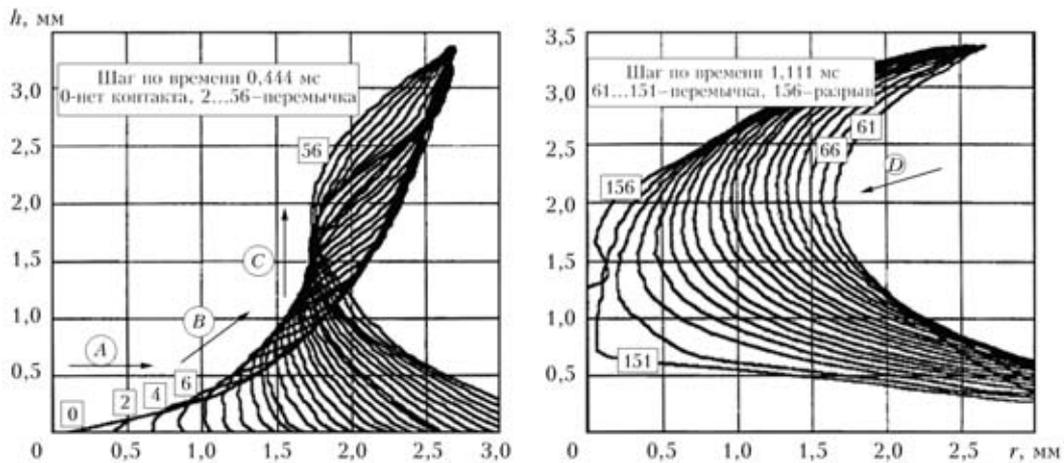


Рис. 4. Динамика изменения профиля жидкой перемычки (перетекание капли воды) [19]

ляет увеличение площади контакта капли с ванной и тем самым затягивает процесс переноса. Более того, диаметр шейки перемычки может даже уменьшиться вплоть до нуля, и перенос материала капли в ванну не произойдет. По мере перетекания материала перемычки в сварочную ванну минимальный диаметр перемычки возрастает от нуля (в момент контакта) до некоторого максимума, а затем уменьшается снова до нуля (происходит разрыв перемычки). При этом положение минимального радиуса смещается в сторону изделия (рис. 4) [19]. Только на этом этапе электромагнитные силы способствуют переносу капли. Обычно импульс тока КЗ подают с фиксированным временем задержки $T_{кз0} = 0,6...1,0$ мс после начала КЗ (см. рис. 3) [7, 8, 12, 15, 17, 20]. По нашему мнению, наиболее целесообразно прикладывать импульс тока переноса при достижении радиуса шейки перемычки максимального значения (рис. 4) или, что то же самое, при минимуме сопротивления цепи электрод–деталь (зона В, рис. 5 [19]). В этом случае ток переноса максимально уменьшает время КЗ. Этот вывод подтверждается экспериментально [8], а также физическим [9] и компьютерным моделированием разрыва жидких перемычек (рис. 6) [10].

Поскольку электромагнитные силы пропорциональны квадрату тока, то ток КЗ целесообразно ус-

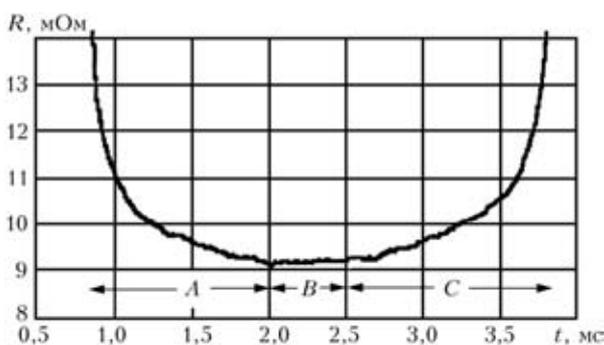


Рис. 5. Изменение сопротивления цепи электрод–деталь во время КЗ ($I = 190$ А, $v_{св} = 5,2$ м/мин, $L = 14$ мм, проволока диаметром 1,2 мм) [19]

танавливать на максимально допустимом для данного источника питания уровне. Очевидно, что при этом наименьшее время переноса капли обеспечивает прямоугольный импульс тока КЗ. Пилообразный [12, 21, 22] и трапецидальный [7, 15, 21] импульсы тока хороши только тем, что имеют пониженный ток на начальной стадии КЗ при $T_{кз0} \sim 0$, когда ток только препятствует переносу капли.

Управление процессом разрыва жидкой перемычки. Разрыв жидкой перемычки под током сопровождается электрическим взрывом и является основной причиной выплесков при сварке в CO_2 с КЗ дугового промежутка. Для устранения этого недостатка следует как можно больше уменьшать ток через перемычку при ее разрыве.

Первым в 1970 г. этот способ снижения разбрызгивания заявил И. И. Заруба [23], а в 1971 г.

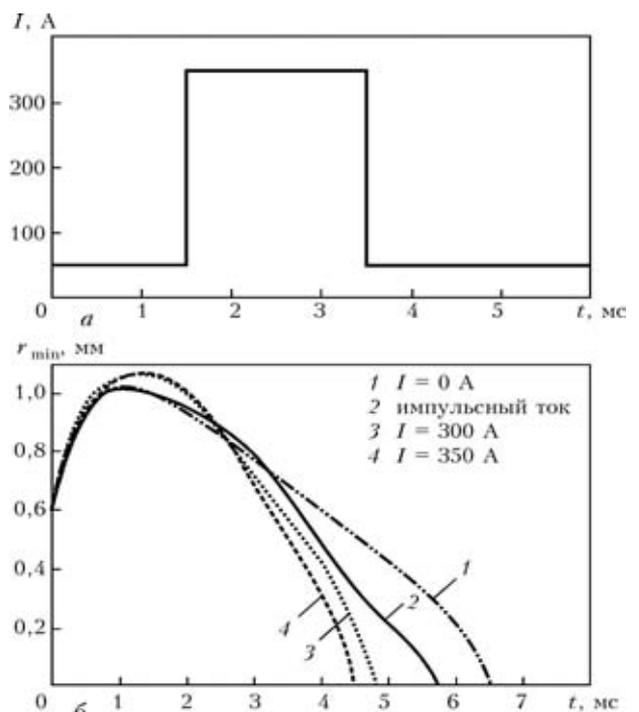


Рис. 6. Влияние тока переноса (а) и минимального радиуса перемычки r_{min} (б) на длительность КЗ [10]

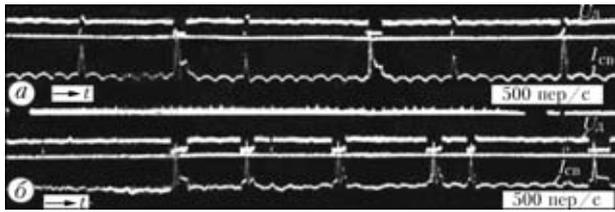


Рис. 7. Осциллограммы напряжения и тока при сварке в CO_2 : а, б — импульсы тока подаются соответственно в начале и середине длительного КЗ [5]

опубликовал и результаты практической его реализации [5]. Здесь импульс тока КЗ фиксированной длительности начинался с задержкой после возникновения КЗ и заканчивался до разрыва перемычки (рис. 7). Позднее авторы работы [20] использовали переменный по длительности импульса переноса. Он автоматически отключался, когда падение напряжения на перемычке повышалось до заданного уровня вследствие утончения перемычки перед ее разрывом.

Следующий шаг осуществил С. И. Пинчук с соавторами в 1976 г. [24]. Было разработано устройство, снижающее на фиксированный интервал времени ток КЗ до 2...10 А непосредственно перед разрывом перемычки, когда напряжение на ней начинает резко возрастать и достигает значения 8...12 В (рис. 8) (в работах [5, 20] минимальный ток КЗ оставался на уровне 100...130 А).

С тех пор ничего принципиально нового не было предложено, и во всех последующих публикациях использован способ И. И. Зарубы в чистом виде, либо усовершенствованный С. И. Пинчуком [7, 12, 16, 22, 25, 26]. Основные усовершенствования касались оборудования, реализующего способ. Лишь Е. К. Става [15] для определения момента подачи команды на снижение тока импульса КЗ использовал не падение напряжения на промежутке токоподвод–деталь, а скорость его изменения. Это усложняет аппаратуру или программное обеспечение, но снижает влияние сопротивления вылета электрода и детали. Падение напряжения токоподвод–деталь имеет вид

$$U_{\text{т-д}}(t) = I(R_{\text{эл}} + R_{\text{пер}}(t) + R_{\text{дет}}). \quad (1)$$

Поскольку во время КЗ изменяется только $R_{\text{пер}}(t)$, то

$$\frac{dU_{\text{т-д}}}{dt} = \frac{d(IR_{\text{пер}})}{dt} \quad (2)$$

и состояние перемычки перед разрывом определяется более точно (однако приходится задерживать начало анализа $dU_{\text{т-д}}/dt$ на 100 мкс после включения импульса тока КЗ [27]). В противном случае схема управления может отключить импульс тока КЗ не непосредственно перед разрывом перемычки, а сразу после его включения.

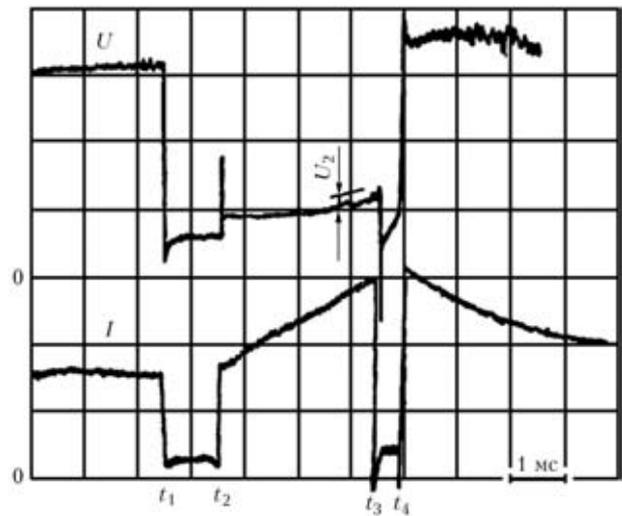


Рис. 8. Осциллограммы напряжения и тока при стабилизированном переносе металла с ограничением энергии взрыва перемычки [24]

По нашему мнению, для определения момента отключения импульса тока переноса наилучшие результаты должно дать использование скорости изменения сопротивления перемычки как параметра, не зависящего от тока.

Резкое уменьшение диаметра шейки перемычки перед ее разрывом длится порядка $10 \cdot 10^{-6}$, а лавинообразное уменьшение шейки (ее взрыв) — порядка $0,1 \cdot 10^{-6}$ с [4]. Если начать снижать ток КЗ слишком поздно и скорость его снижения невелика, то разрыв перемычки произойдет при значительном токе с большой вероятностью разбрызгивания. Если слишком рано снизить ток КЗ, то повышается вероятность того, что перемычка вообще не разорвется. Таким образом, система управления должна обеспечивать надежное определение момента начала необратимого уменьшения диаметра шейки перемычки и существенно снизить ток КЗ до ее разрыва. Вероятно, эта задача до настоящего времени в полной мере не решена.

Управление плавлением электрода, ростом и размерами капли. После разрыва перемычки загорается дуга, начинается плавление электрода энергией, поступающей как от дуги, так и от выделяемой в вылете электрода за счет проходящего тока. Задачей системы управления на этом этапе является обеспечение получения заданного объема капли независимо от возмущений, действующих на процесс (колебаний скорости подачи электрода, напряжения сети, вылета электрода, расстояния от горелки до изделия и т. п.).

Обычно для сварки в CO_2 с КЗ и постоянной скоростью подачи электродной проволоки используют источники с пологопадающей внешней характеристикой. Стабильность процесса при этом обеспечивается благодаря свойству саморегулирования системы источник напряжения–плавящийся электрод–дуга. При уменьшении длины ду-



ги автоматически возрастает ток, что приводит к увеличению дугового промежутка, и наоборот. Подобный принцип лежит и в современных японских инверторных источниках питания для сварки в CO_2 с КЗ [8, 13, 16]. В них во время КЗ источник переключается в режим управления током, а на время горения дуги — в режим постоянного напряжения (рис. 9) [13].

Наиболее совершенные источники используют импульсный режим управления формированием капли расплавленного металла. На первом этапе горения дуги происходит интенсивное плавление электрода большим током до достижения заданного объема капли, затем ток существенно снижается. Силы, действующие на каплю, которая находится на торце электрода, и стремящиеся сместить ее к боковой поверхности электрода, уменьшаются и капля занимает соосное с электродом положение. Под действием сил поверхностного натяжения форма капли приближается к правильной сфере, что создает благоприятные условия для плавного перехода капли в сварочную ванну.

Чтобы минимизировать хаотическое движение капли, ее размер должен быть небольшим, например, не более диаметра электрода [28]. По мнению специалистов «Линкольн Электрик» [15], средний размер расплавленной сферической капли на торце электрода для хорошего переноса должен быть $1,2d_{эл}$. Авторы работы [29] считают, что оптимальный диаметр капли составляет $1,4...1,7d_{эл}$ для $d_{эл} = 1,6$ и $1,56...1,88d_{эл}$ для $d_{эл} = 2$ мм.

Возможны два варианта получения капель заданной массы. По первому управление плавлением металла осуществляется с помощью импульсов тока постоянной амплитуды $I_{и}$ и длительности $t_{и}$. По второму варианту дуга питается от источника напряжения, а длительность импульса автоматически устанавливается в функции некоторых параметров процесса сварки. Первый прин-

цип описывается в работах [12, 15, 21], а разновидности второго — в [30, 31].

Авторами работы [12] рассматривается дуга (рис. 10), питаемая от управляемого источника тока с жестко заданной амплитудой $I_{пл}$ и длительностью $T_{пл}$ импульса плавления. Длительность паузы «успокоения» капли $T_{усп}$ с малым током дуги перед КЗ $I_{усп}$ устанавливается автоматически. Система имеет свойство саморегулирования при возмущениях по длине дуги, скорости подачи проволоки до тех пор, пока длительность паузы отлична от нуля. Возмущения по длине вылета электрода не компенсируются и приводят к изменению объема капли.

В источнике STT [15] осуществляется некоторая компенсация изменения длины вылета электрода путем автоматической коррекции длительности импульса тока с постоянной амплитудой. Делается это следующим образом. Во время КЗ система измеряет падение напряжения на электроде, пропорциональное вылету электрода. Оно усредняется и подается на интегратор. Последний начинает интегрирование с нулевыми начальными условиями в момент зажигания дуги. Когда напряжение на выходе интегратора сравнивается с регулируемым опорным напряжением (устанавливается ручкой «тепло» на передней панели источника), импульс плавления прекращается, а ток дуги начинает плавно спадать до базового тока паузы. Таким образом, длительность импульса тока плавления обратно пропорциональна длине дуги.

В большинстве случаев такая компенсация только ухудшает стабильность размера капель при изменении длины вылета электрода. Обычно энергия, выделяющаяся в электроде, относительно невелика (менее 15...20%), поэтому происходит перекompенсация возмущения.

Для плавления электрода форма импульса тока особой роли не играет, однако в источниках STT и НПП «Технотрон» (рис. 11) [21] предусмотрен регулируемый плавный спад импульса тока плав-

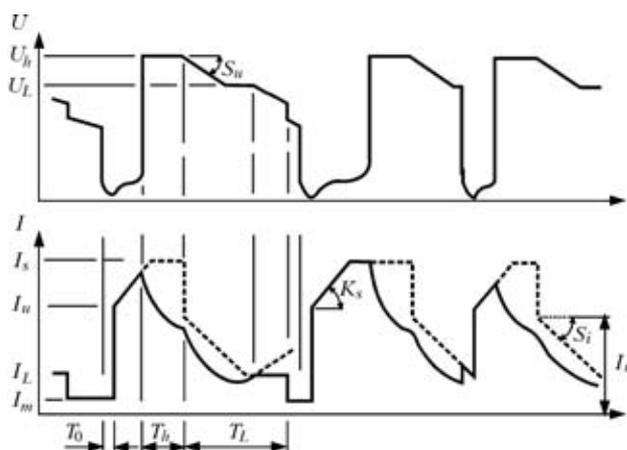


Рис. 9. Осциллограммы напряжения и тока инверторных источников питания при сварке в CO_2 [13]

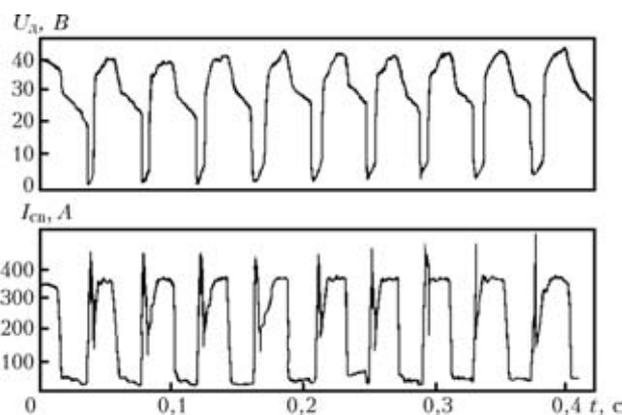


Рис. 10. Осциллограммы напряжения и сварочного тока при питании дуги импульсами тока постоянной амплитуды и длительности [12]

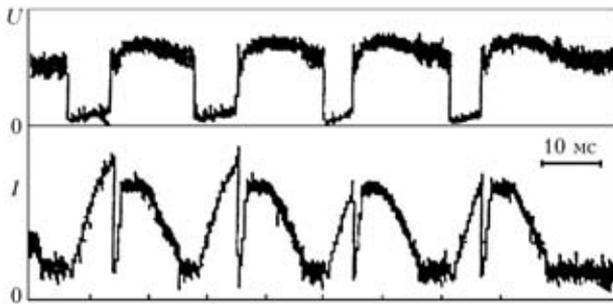


Рис. 11. Осциллограммы напряжения и тока. Импульсы тока плавления электрода с плавным спадом заднего фронта [21]

ления. Предполагается, что при этом демпфируются колебания капли и сварочной ванны. Ни теоретических, ни экспериментальных данных в пользу этого предположения не приводится.

В источниках, предложенных А. Ф. Князьковым и Ю. Н. Сараевым, длительность импульса плавления (выходная вольт-амперная характеристика источника пологопадающая) устанавливается следующим образом:

пропорционально длительности дугового промежутка к началу действия импульса тока плавления [32]. Отсчет измеряемой длительности дугового промежутка ведется от момента зажигания дуги до снижения напряжения на ней до некоторого опорного значения $U_{оп}$;

пропорционально интегралу напряжения дуги на стадии параметрически задаваемой паузы к моменту разрушения переключки [33];

пропорционально длительности паузы перед КЗ [34].

Во всех этих источниках наиболее важными являются не требования стабильности размера капли, а требования стабильности процесса с учетом поведения сварочной ванны в зависимости от пространственного положения шва. Плавление расходуемого электрода и формирование капли расплавленного металла определяется сложным комплексом электромагнитных и гидродинамических сил в гравитационном поле и, следовательно, в полной мере может быть описано только с привлечением законов теплофизики, электростатики, электродинамики, электромагнетизма и гидродинамики. Эта задача в настоящее время полностью не решена, но теоретически и экспериментально исследованы некоторые ее аспекты. С помощью метода теплового баланса и экспериментальных данных были предложены отношения между такими существенными сварочными параметрами, как сварочный ток $I(t)$, скорость плавления расходуемого электрода $U_{пл}(t)$, вылет электрода $l_{эл}(t)$ и т. д. [35]. Обобщая все эти модели, приходим к модели вида

$$U_{пл}(t) = aI(t) + bl_{эл}(t)I^2(t), \quad (3)$$

где a, b — коэффициенты пропорциональности. Скорость роста объема капли

$$\frac{dV_{кап}(t)}{dt} = S_{эл} U_{пл}(t), \quad (4)$$

где $V_{кап}(t)$ — объем капли; $S_{эл}$ — площадь поперечного сечения электрода.

Подставив (3) в (4), получим

$$V_{кап}(t) = S_{эл} \int_0^t [aI(t) + bl_{эл}(t)I^2(t)] dt. \quad (5)$$

Для стабилизации объема капли система управления должна решать уравнение (5) в реальном масштабе времени относительно $T_{пл}$ для данных $V_{кап}(t), I(t), a, b$ и $l_{эл}(t)$. Объем капли $V_{кап}$ определяется при задании режима сварки, $I(t)$ — во время сварки, a — пропорционально катодному падению напряжения и в первом приближении является постоянной величиной. Произведение $bl_{эл}$ определяется из падения напряжения в цепи сварки при КЗ дугового промежутка. Напряжение КЗ в момент наибольшего диаметра шейки переключки равно

$$U_{к-д} = bl_{эл} I_{кз},$$

откуда находится $bl_{эл}$. Таким образом, все составляющие уравнения (3) известны, что дает возможность в реальном масштабе времени подсчитывать объем растущей капли. Когда интеграл (5) достигнет заданного значения, система управления отключает импульс тока плавления, завершая интервал $T_{пл}$. Используя этот алгоритм, система управления обеспечивает получение каждой капли заданного объема, независимо от большинства возмущений, действующих на процесс.

Совершенно новую концепцию реализации «идеального» цикла сварки (см. рис. 2) предложили китайские ученые [36, 37]. Вместо программного задания формы импульсов тока сварки используется источник питания со сложной внешней характеристикой. Для сварки в CO_2 с КЗ внешняя характеристика источника питания имеет семь сегментов (рис. 12, а) [36]. Кроме того, внешняя характеристика автоматически адаптируется к мгновенным изменениям тока и напряжения дуги (сегменты $B'C'$ и EF'). В результате формируется близкий к «идеальному» цикл сварки независимо от возмущений, действующих на процесс (рис. 12, б). В качестве регулирующего элемента использованы параллельно включенные транзисторы, работающие в линейном режиме. Внешняя характеристика источника формируется схемой управления с нелинейными обратными связями по току и падению напряжения на нагрузке [37]. Линейный режим работы транзисторов позволяет получить предельно быстрое прецизионное управ-

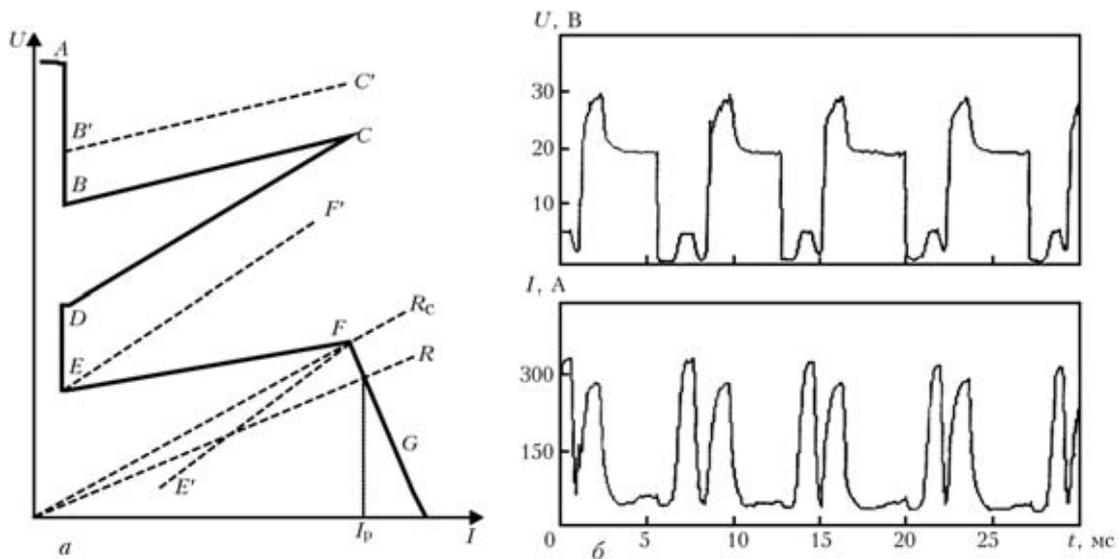


Рис. 12. Внешняя характеристика источника при сварке в CO_2 с КЗ (а) и осциллограммы напряжения и тока (б) [36]

ление процессом сварки, но требует рассеивания на транзисторах мощности, сопоставимой с мощностью сварки.

Стадия «успокоения» капли (интервал $T_{усп}$). После окончания импульса плавления система управления должна снизить ток до значения, еще обеспечивающего устойчивое горение дуги, но недостаточного для заметного плавления электрода. Давление дуги на каплю значительно снижается, она принимает соосное с электродом положение и форму, близкую к аксиально-симметричной. Через некоторое время в результате подачи электрода и возвратного движения возмущенной поверхности сварочной ванны они встретятся, произойдет КЗ и цикл сварки повторится.

Наличие интервала времени «успокоения» капли необходимо для устранения возмущений по длине дугового промежутка. При внезапном изменении последнего время до КЗ $T_{усп}$ автоматически увеличивается или уменьшается путем изменения вылета электрода. В результате уже в следующем цикле длина дугового промежутка устанавливается равной заданной, т. е. в отличие от традиционных систем с саморегулированием, данная система имеет предельную скорость отработки возмущений по длине дуги.

1. 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 // Автомат. сварка. — 1973. — № 4. — С. 64–67.
2. Лебедев В. К., Заруба И. И., Андреев В. В. Условия образования жидкой перемишки при капельном переносе металла с короткими замыканиями дугового промежутка // Там же. — 1975. — № 9. — С. 1–3, 8.
3. Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
4. Untersuchungen zum Metall-Schutzgasschweißen mittels Ultrahochgeschwindigkeitskinematografie und schneller Erfassung elektrischer Schweißparameter / D. Rehfeldt,

- A. Bollmann, M. Niemann et al. // Schweissen und Schneiden. — 1989. — № 3. — S. 139–141.
5. Заруба И. И., Дыменко В. В. Регулирование параметров процесса сварки с короткими замыканиями // Автомат. сварка. — 1971. — № 8. — С. 43–45.
6. К вопросу о переносе металла короткими замыканиями / А. Г. Потапьевский, М. Г. Лифшиц, Д. С. Кассов, Л. М. Кулывацкий // Свароч. пр-во. — 1976. — № 6. — С. 53–54.
7. Стабилизация переноса и снижение разбрызгивания металла при сварке в CO_2 короткой дугой / И. С. Пинчук, А. Л. Хейфец, В. Ф. Постаушкин, Г. Д. Куликов // Там же. — 1980. — № 6. — С. 9–10.
8. Yamamoto H., Okazaki K., Harata S. The effect of short circuiting current control on the spatter generation in CO_2 arc welding. — [1986]. — P. 1–17 (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-649-86).
9. Maruo H., Hirata Y., Goto N. Bridging transfer phenomena of conductive pendent drop. The effects of electromagnetic pinch force on the bridging transfer (Rept. 3) // Quarterly J. of JWS. — 1992. — № 2. — P. 251–258.
10. Choi S. K., Yoo C. D., Kim Y.-S. Dynamic simulation of metal transfer in GMAW. — Pt 2: Short-circuit transfer mode // Welding J. — 1988. — № 1. — P. 45–51.
11. А. с. 930824 СССР, МКИ В 23 К 9/11. Способ электродуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и устройство для его осуществления / А. Ф. Князьков, А. Г. Мазель, Р. И. Дедюх и др. — Опубл. 23.04.85, Бюл. № 19.
12. Патон Б. Е., Лебедев А. В. Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1988. — № 11. — С. 1–3.
13. Matsuda F., Ushio M., Mita T. Wellenformsteuerungsmethode im CO_2 Schweißen // Trans. JWRI. — 1988. — № 2. — P. 11–17.
14. Yamamoto H., Harada S., Yasuda H. The development of welding current control system for spatter reduction // Welding Intern. — 1990. — № 4. — P. 398–407.
15. Stava E. K. The surface-tension transfer power source: A new, low-spatter arc welding machine // Welding J. — 1993. — № 1. — P. 25–29.
16. Ushio M., Yamamoto H., Nishida Y., Mita T. Recent advances in welding power systems for automated welding // Trans. JWRI. — 1994. — № 1. — P. 1–6.
17. Nacey T. Y. Fourth-generation inverters add artificial intelligence to the control of GMA welding // Welding J. — 1993. — № 1. — P. 31–34.
18. Замечания к статье «Определение устойчивости перемишки между плавящимся электродом и сварочной ванной» / И. С. Пинчук, В. Ф. Постаушкин, Г. Д. Куликов и др. // Свароч. пр-во. — 1974. — № 10. — С. 49–50.



19. Orszach P., Kim Y. C., Horikawa K. Short-circuit transient phenomena in GMA/CO₂ Welding (I) // Trans. JWRI. — 1997. — № 1. — P. 49–67.
20. Boughton P., MacGregor G. J. Control of short circuiting in MIG-welding // Welding Res. Intern. — 1974. — № 2. — P. 31–53.
21. Управление переносом капли при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С. И. Полосков, Ю. С. Ищенко, В. А. Лебедев, О. Б. Гецкин // Свароч. пр-во. — 2001. — № 6. — С. 6–9.
22. Хейфец А. Л. Сравнительная оценка некоторых способов уменьшения разбрызгивания металла при сварке в CO₂ // Автомат. сварка. — 1986. — № 3. — С. 58–60.
23. А. с. 271680 СССР, МКИ В 23 К 9/00. Способ электродуговой сварки плавящимся электродом / И. И. Заруба. — Оpubл. 26.05.70, Бюл. № 8.
24. Уменьшение разбрызгивания при сварке с короткими замыканиями путем ограничения энергии взрыва перемычки / И. С. Пинчук, В. Ф. Постаушкин, Г. Д. Куликов и др. // Свароч. пр-во. — 1976. — № 11. — С. 52–54.
25. Горнов О. М. Об уменьшении разбрызгивания путем снижения тока короткого замыкания при сварке в углекислом газе // Сб. науч. тр. Перм. политехн. ин-та. — 1975. — № 164. — С. 115–118.
26. Горнов О. М., Чумак Л. Ф. Влияние ступенчатого уменьшения тока в момент короткого замыкания на разбрызгивание при сварке в углекислом газе // Там же. — 1972. — № 116. — С. 101–103.
27. Pat. 4,954,691 US. Method and device for controlling a short circuiting type welding system / J. Parks, E. Stava. — Publ. 04.09.90.
28. Воронай Н. М., Лаврищев В. Я. Условия переноса металла при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1976. — № 5. — С. 8–11.
29. Особенности управляемого тепломассопереноса при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С. И. Полосков, Ю. С. Ищенко, В. А. Лебедев, О. Б. Гецкин // Свароч. пр-во. — 2002. — № 7. — С. 6–13.
30. Сараев Ю. Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов // Там же. — 2001. — № 1. — С. 4–11.
31. Сараев Ю. Н. Управление переносом электродного металла при сварке в CO₂ с короткими замыканиями дугового промежутка (Обзор) // Автомат. сварка. — 1988. — № 12. — С. 16–23.
32. А. с. 768108 СССР, МКИ В 23 К 9/00. Способ электродуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка / А. Ф. Князьков, Ю. Н. Сараев, Р. И. Дедюх. — Оpubл. 15.01.84, Бюл. № 2.
33. А. с. 951810 СССР, МКИ В 23 К 9/00. Способ дуговой сварки плавящимся электродом / А. Ф. Князьков, Ю. Н. Сараев, А. К. Тимошенко. — Оpubл. 23.12.83, Бюл. № 47.
34. А. с. 1168367 СССР, МКИ В 23 К 9/00. Способ электродуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и устройство для его осуществления / А. Ф. Князьков, Ю. Н. Сараев, А. К. Тимошенко. — Оpubл. 23.07.85, Бюл. № 27.
35. Lesenewich A. Control of melting rate and metal transfer. Part I. Control of electrode melting rate // Welding J. — 1958. — № 8. — P. 334–353.
36. Ou Z., Wuang Y., Ushio M., Tanaka M. New concept for the characteristic of an arc welding power source (Report II) // Trans. JWRI. — 1999. — № 1. — P. 5–8.
37. Pan J. Arc welding control. — Cambridge: Woodhead publ. Ltd., 2003. — 603 p.

A review of publications on automatic control of the process of CO₂ welding with short-circuiting of the arc gap is given. Control algorithms are given for each stage of the welding cycle.

Поступила в редакцию 11.05.2006

К 125-ЛЕТИЮ ИЗОБРЕТЕНИЯ ПЕРВОГО СПОСОБА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ

13 октября 2006 г. в НТУУ «Киевский политехнический институт» состоялись очередные научные чтения в рамках «Конструктора Украины». На этот раз конференция была посвящена жизни и творческой деятельности Николая Николаевича Бенардоса, выдающегося отечественного изобретателя, создавшего в 1881 году первый способ электродуговой сварки.

Собрание, на котором присутствовали студенты и преподаватели сварочного факультета университета, ученые ИЭС им. Е. О. Патона, члены Общества сварщиков Украины, слушатели Малой академии наук, работники музеев Н. Н. Бенардоса в Переяслав-Хмельницком, краеведческого музея в Фастове и Политехнического музея, открыл проректор университета по научной работе чл.-кор. НАНУ М. Ю. Ильченко. Во вступительном слове он подчеркнул, что проведение «Чтений» имеет большое значение для сохранения исторического наследия и пропаганды вклада отечественных изобретателей и ученых в мировую цивилизацию. Ведущий научный сотрудник ИЭС им. Е. О. Патона А. Н. Корниенко рассказал о поиске материалов о жизни и деятельности Н. Н. Бенардоса, начатых по инициативе академика Б. Е. Патона, отметил, что институтом сооружены памятники изобретателю в Фастове и Ивановской области, созданы экспозиции в музеях, сняты кинофильмы. О подробностях деятельности Н. Н. Бенардоса присутствующие узнали из кинофильма «У истоков Электрогефеста». Доклады о современном состоянии различных направлений и разделов сварочной науки и техники, о работах сварочного факультета сделали заведующие кафедрами профессора С. К. Фомичев, В. М. Прохоренко и В. Д. Кузнецов; исполнительный директор технопарка «ИЭС им. Е. О. Патона» А. А. Мазур.