

Опубликовано: Технология машиностроения. - 2008. - №10. - С. 25-29.
УДК 621.791.754

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСОМ КАПЕЛЬ ПРИ СВАРКЕ С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ

О.Б. Гецкин, инж., С.И. Полосков, д-р. техн. наук (НПП «ТехноТрон»)
В.А. Ерофеев, канд. техн. наук (ТулГУ)
О.П. Витько, инж. (ИСК «Росатомстрой»)

Короткие замыкания (КЗ) дугового промежутка при сварке плавящимся электродом обеспечивают относительно раздельное плавление электродного металла и тепловложение в сварочную ванну [1]. Благодаря этому процесс сварки с КЗ успешно применяют при орбитальной сварке [2]. Однако даже незначительные возмущения, например, при работе сварочных источников от автономных источников энергии [3], могут перевести процесс сварки с КЗ в режим капельного переноса с повышенным разбрызгиванием или вызвать "примерзание" электрода. Для расширения области устойчивых режимов разрабатывают специальные источники [4], которые целенаправленно реализуют управляемый каплеперенос (УКП) электродного металла. Разработка подобных источников стала возможной благодаря развитию микропроцессорной техники и созданию мощных транзисторных ключей, позволяющих осуществлять быструю коммутацию сварочного тока.

Вместе с тем, алгоритм управления коммутацией тока - сложная инженерная задача, обусловленная необходимостью учета быстропротекающих явлений процесса сварки. Так как исходные зависимости представляют физические закономерности, то их целесообразно изучать на физико-математических моделях с имитацией быстропротекающих элементов реального процесса, которые сложно описать другими методами. Достоинством имитационного моделирования является различие временных факторов в реальных процессах и их моделях, что позволяет анализировать процессы в ускоренном или замедленном темпе, и даже останавливать для изучения характерных особенностей в какой-то момент времени.

Цель работы - имитационное моделирование быстропротекающих явлений при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка для определения параметров управляемого каплепереноса электродного металла.

Результатом исследований по УКП [5-8] стал "идеальный" цикл сварки с УКП, в котором отдельные фазы цикла управляются по собственным алгоритмам, рис. 1. При этом большинство авторов выделяют пять характерных фаз УКП: образование капли при плавлении электродной проволоки, успокоения капли, КЗ и слияния капли с ванной с разрывом перемычки в зоне "капля-проволока".

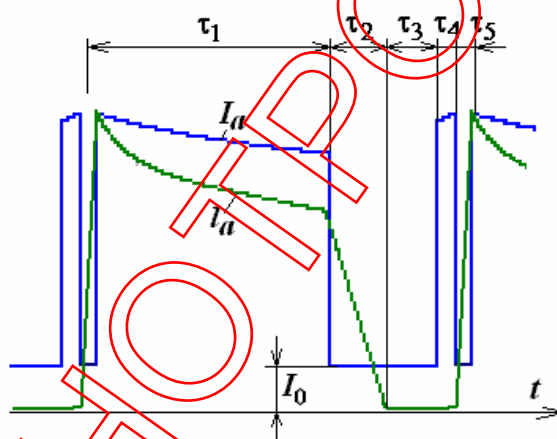


Рис. 1. Фазы процесса дуговой сварки с периодическими короткими замыканиями

Фаза τ_1 плавления электродной проволоки характеризуется большим значением тока I_a дуги, что обеспечивает рост капли. В этой фазе капля испытывает сильное электродинамическое давление и давление реактивной отдачи пара. Флуктуация активного пятна дуги по поверхности капли и неустойчивое направление действия давлений приводит к формированию каплей неправильной формы, что может вызывать их отталкивание от поверхности ванны, приводящее к разбрызгиванию электродного металла. Это обстоятельство ограничивает длительность фазы τ_1 и максимальные значения тока дуги в период роста капли. Определено [9], что устойчивый тепломассоперенос каплей достигается в том случае, когда их размер в конце этой фазы составляет $(1,2 \dots 1,7)d_f$, где d_f - диаметр проволоки.

В фазе τ_2 успокоения целесообразно уменьшить ток до минимального значения I_0 , при котором обеспечивается устойчивое горение дуги. Электродинамическое и реактивное давления на поверхности капли исчезают, а капля приобретает устойчивую сферическую форму под действием сил поверхностного натяжения. Плавление и рост объёма капли прекращаются, а длина дуги l_a уменьшается со скоростью подачи проволоки.

В начале фазы τ_3 КЗ поверхность капли соприкасается с поверхностью сварочной ванны и в точке соприкосновения возникает значительная сила поверхностного натяжения, которая может либо втянуть металл капли в ванну, либо оттолкнуть каплю от ее поверхности. Распределение тока в капле в момент КЗ сильно изменяется, что изменяет направление электродинамической силы, которая в этой фазе препятствует перетеканию капли в ванну. Поэтому в этой фазе ток поддерживается на минимальном уровне I_0 и нужен только для получения информации о ходе процесса. Окончанием этой фазы считают момент достижения равновесного состояния общей поверхности расплава.

В конце фазы короткого замыкания τ_4 перетекание расплава в сварочную ванну продолжается благодаря наличию сил инерции. В этой фазе электродинамическое давление способствует перетеканию расплава и ток I_a желательно сильно увеличить. Моментом окончания этой фазы является уменьшение площади поперечного сечения перемычки расплава до значений, при которых ток не вызывает кипения металла в перемычке. Перемычка расплава разрывается под действием сил инерции, длина дуги l_a быстро увеличивается и возбуждается дуга. В этой фазе τ_5 значение тока должно быть минимально, но достаточно для стабильного возбуждения дуги.

Описанный алгоритм управлением процессом сварки с УКП может реализовываться различными аппаратными средствами. Наиболее просты в реализации системы управления, рис. 2, на основе быстродействующего ключа, который шунтирует дуговой промежуток в фазах, в которых ток желательно значительно уменьшить, либо совсем отключить.

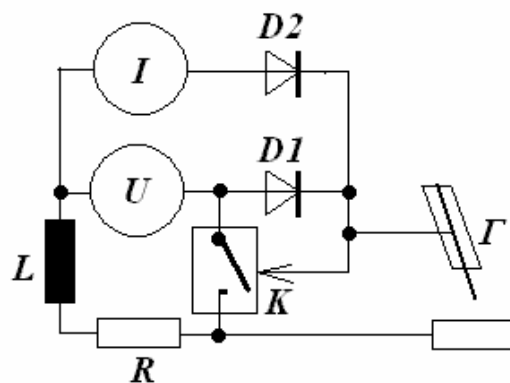


Рис. 2. Электрическая схема управления переносом капель при сварке с КЗ:
 I - источник тока дежурной дуги, U - источник напряжения питания основной дуги, R, L - электрическое сопротивление и индуктивность сварочной цепи, K - транзисторный ключ, управляемый напряжением дуги, Γ - сварочная горелка

Шунтирование дугового промежутка обеспечивает более благоприятные условия работы коммутирующих элементов источника, так как исключает влияние ЭДС самоиндукции сварочной цепи на работу электронных коммутаторов. В фазе формирования капли дуговой промежуток подключён к источнику напряжения U , что обеспечивает эффективное саморегулирование длины дуги с компенсацией нестабильности скорости подачи электродной проволоки изменением тока дуги I_a . Перед КЗ дуговой промежуток кратковременно замыкается транзисторным ключом K . В начальной фазе τ_3 КЗ этот ключ K замкнут и ток через него нарастает до значения I_a . При КЗ ток ограничен электрическим сопротивлением R и индуктивностью L сварочной цепи. В момент, когда сопротивление дугового промежутка достигнет минимума, ключ K размыкается и импульс тока I_a сбрасывает каплю. Перед разрывом перемычки, когда напряжение на дуговом промежутке достигнет значения 8...10 В, этот ключ K снова замыкается. Для повторного возбуждения дуги через дуговой промежуток непрерывно подаётся небольшой ток I_0 . Диоды $D1, D2$ гальванически развязывают цепи питания основной и дежурной дуги.

Такой подход может быть реализован по двум вариантам:

1. Ключ K разомкнут в течение заданного времени, затем замыкается, что приводит к укорочению дуги и короткому замыканию. Затем, после

возбуждения дуги, ключ размыкается.

2. Ключ K разомкнут в течение заданного времени, затем замыкается, что приводит к укорочению дуги и короткому замыканию. Ключ размыкается при КЗ в момент, когда сопротивление переключки начинает увеличиваться. Ключ повторно замыкается перед разрывом переключки по сигналу об увеличении напряжения дуги до величины, равной половине суммы падений напряжений анодной и катодной областях дуги. По истечению времени задержки, длительность которого задана, ключ снова размыкается.

Для определения параметров такой системы управления и параметров процесса сварки с УКП дополнена ранее разработанная физико-математическая модель [10] под виртуальное воспроизведение процесса сварки с КЗ, в которой учтены как параметры процесса формирования капли и перехода ее в ванну, так и процессы коммутации тока в цепи питания дуги.

Имитационное моделирование параметров УКП. Предложенная в работе [10] физико-математическая модель процессов сварки плавящимся электродом описывают особенности плавления электродной проволоки дугой с учётом подогрева ее вылета и условия переноса капли с электрода в сварочную ванну под действием сил тяжести, поверхностного натяжения, электромагнитной силы и силы реактивной отдачи пара металла. Однако эта модель не учитывает динамические изменения тока и напряжения дуги при сварке с КЗ, и поэтому она нуждается в уточнении. Существенным дополнением модели является учет электрических процессов, обеспечивающих управление током дуги в зависимости от фазы цикла сварки с УКП.

Ток I_k , протекающий через ключ, определяется решением уравнения:

$$I_k = \frac{1}{L} \int_0^t (U_{xx} - U_K - R \max(I, I_0)) dt, \quad (1)$$

где L , R - индуктивность и сопротивление сварочной цепи, U_{xx} - напряжение холостого хода источника питания, U_K - напряжение на ключе, I_0 - ток дежурной дуги, t - текущее время процесса. Алгоритм моделирования

процессов сварки с КЗ по уточненной физико-математической модели с расширенными возможностями представлен на рис. 3.

Исходные данные: характеристики электродной проволоки, источника питания, электрической дуги		
Начальное состояние: короткое замыкание дугового промежутка		
Цикл имитации: эволюции физических процессов плавления электрода и горения дуги с малым шагом времени		
Определение фазы процесса		
Короткое замыкание	Горение дуги	Обрыв дуги
Расчёт: сил на перемычке, ускорения, скорости и координат центра тяжести, сопротивления перемычки.	Расчёт: тепловой мощности дуги, размера капли, воздействий на каплю Расчёт длины дугового промежутка	Расчет: минимального тока обрыва
Расчёт напряжения и тока в сварочной цепи Расчёт нагрева вылета электрода		
Анализ условий завершения микроцикла сварки		
Разрыв перемычки	Отрыв капли	Короткое замыкание
Повторение цикла имитации		

Рис. 3. Алгоритм имитационного моделирования особенностей процесса сварки с КЗ

По первому варианту напряжение на ключе изменяется в следующих пределах:

$$U_K = \begin{cases} U_D & \text{при } \tau < \tau_u \\ 0 & \text{при } \tau > \tau_u \end{cases} \quad (2)$$

где U_D - напряжение на дуговом промежутке, τ_u - заданная длительность импульса в фазе плавления проволоки, τ - время, отсчитываемое от момента возбуждения дуги.

По второму варианту управления напряжение на ключе изменяется в соответствии с логической функцией управления:

$$U_K = \begin{cases} U_D & \text{при } \tau_0 < \tau < \tau_u \cup \frac{dR_K}{dt} > 0 \cap U_D < \frac{U_{ak}}{2} \\ 0 & \text{при } 0 > \tau > \tau_0 \cup \tau > \tau_u \cup \frac{dR_K}{dt} < 0 \cap U_D < \frac{U_{ak}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

где: τ_0 - заданная задержка времени отключения ключа после возбуждения

дуги, R_K - сопротивление дугового промежутка в фазе КЗ, U_a - суммарное падение напряжения в анодной и катодной областях дуги.

Напряжение дугового промежутка в фазе горения дуги определяется её ВАХ, а в фазе КЗ - падением напряжения в вылете и перемычке расплава. При моделировании учитывается расположение центра масс Z_K капли при её перемещении в сварочную ванну под действием сил поверхностного натяжения, тяжести и электродинамической силы. В моменты соприкосновения капли с ванной и при её отрыве от электрода сопротивление жидкой перемычки весьма значительно. Общее сопротивление перемычки R_K равно сумме двух сопротивлений: контакта капли с ванной и капли с торцом электродной проволоки. Размеры контактов соотносятся с координатой Z_K центра масс капли [10]. Это позволяет описать сопротивление перемычки следующей функцией:

$$R_K \approx \rho_K \frac{D}{d_f \sqrt{(D - 2Z_K)(D + d_f - 6Z_K)}}, \quad (4)$$

где ρ_K - удельное сопротивление расплава, D - диаметр капли в момент КЗ.

На рис. 4 показан результат расчёта сопротивления в зависимости от координаты центра масс капли. Характер изменения и значения сопротивления совпадает с результатами работы [11].

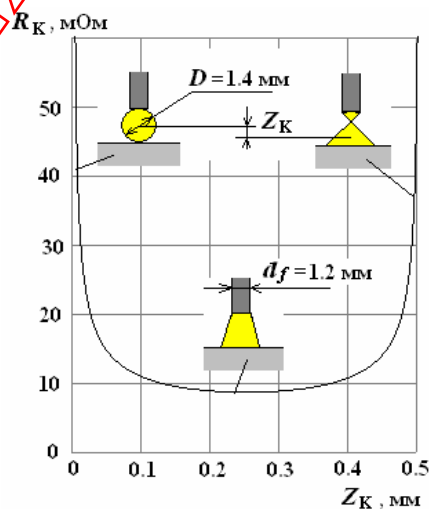


Рис. 4. Зависимость сопротивления R_K перемычки расплава от координаты Z_K центра масс капли

Модель реализована в компьютерной программе для имитационного моделирования особенностей управления каплепереноса при сварке с КЗ.

Результаты имитационного моделирования УКП. Имитационное моделирование по модели, представленной на рис. 2, позволяет определить изменение во времени множества взаимосвязанных параметров процесса сварки в фазах короткого замыкания, плавления электрода и формирования капли при разных алгоритмах управления каплепереносом. Моделирование выполнено для случая сварки в CO₂ стальной проволокой диаметром 1,2 мм и скорости её подачи 120 мм/с. Сварочный источник имел постоянный угол наклона ВАХ равный 0,08 В/А. Наиболее наглядно прецизионные условия стабильного УКП выявлены, когда моделирование выполнили для случаев замыкания ключа (рис.1) на весь период КЗ, а также при кратковременном размыкании ключа в завершающей фазе КЗ. Для сравнения была выполнена имитация процесса сварки без активных воздействий на каплеперенос для тех же значений диаметра и скорости подачи электродной проволоки. В этом случае для получения режима КЗ уменьшали U_{xx} источника питания сварочной дуги.

Исходные параметры процесса сварки с КЗ (U_0 , I_0 , длительность импульса тока плавления τ_l и длительность задержки включения тока τ_5 после КЗ) при трех разных вариантах управления приведены в табл. 1.

Исходные параметры процесса сварки с короткими замыканиями при различных алгоритмах управления

Таблица 1.

Вариант управления	Алгоритм управления	Параметры процесса			
		U_{xx} , В	τ_l , мс	τ_5 , мс	I_0 , А
1	С полным ограничением тока короткого замыкания	35	20	0.5	40
2	С подачей импульса тока при коротком замыкании	35	20	0.5	40
3	Без активных воздействий	30	-	0	0

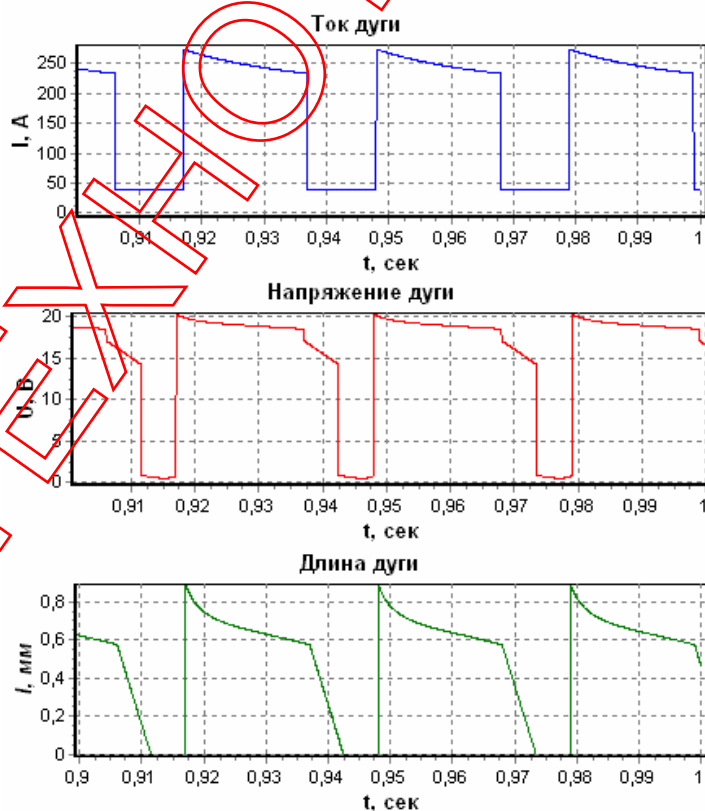
В табл. 2 представлены основные результаты расчёта технологических характеристик процесса сварки с КЗ при различных алгоритмах управления каплепереносом электродного металла.

Технологические характеристики процесса сварки с короткими замыканиями для разных вариантов управления каплепереносом

Таблица 2.

Параметр процесса	Вариант управления		
	1	2	3
Максимальный ток, А	270	265	210
Среднее значение тока, А	172	185	198
Максимальная длина дуги, мм	0.9	0.9	0.62
Средняя длина дуги, мм	0.48	0.47	0.19
Длительность КЗ, мс	5.6	5.4	4
Период переноса капель, мс	33	33	16
Диаметр капель, мм	1.65	1.65	1.25
Температура капель, С ⁰	1780	1750	1680
Температура прогрева вылета, С ⁰	336	368	372

На рис. 5...7 показаны результаты компьютерной имитации процесса сварки с КЗ в виде графиков синхронного изменения сварочного тока, напряжения и длины дуги нескольких последовательных микроциклов переноса электродного металла в сварочную ванну.



0.02 с, 35 В, 0.08 Ом, 1.2 мм, 120 мм/с

Рис. 5. Результат имитации процесса сварки с УКП при полном ограничении тока КЗ

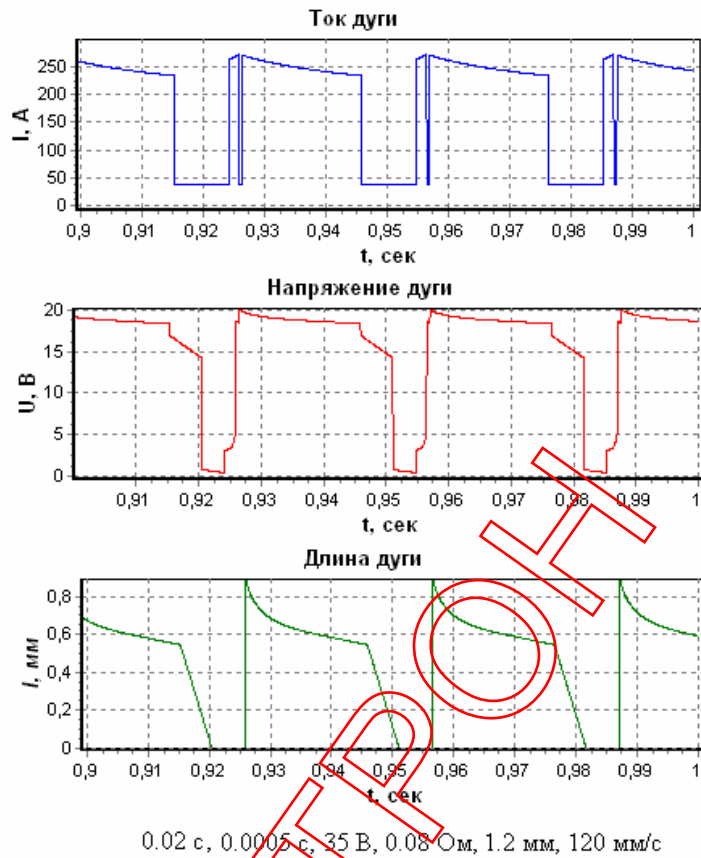


Рис. 6. Результат имитации процесса дуговой сварки с УКП с подачей импульса тока в завершающей фазе КЗ

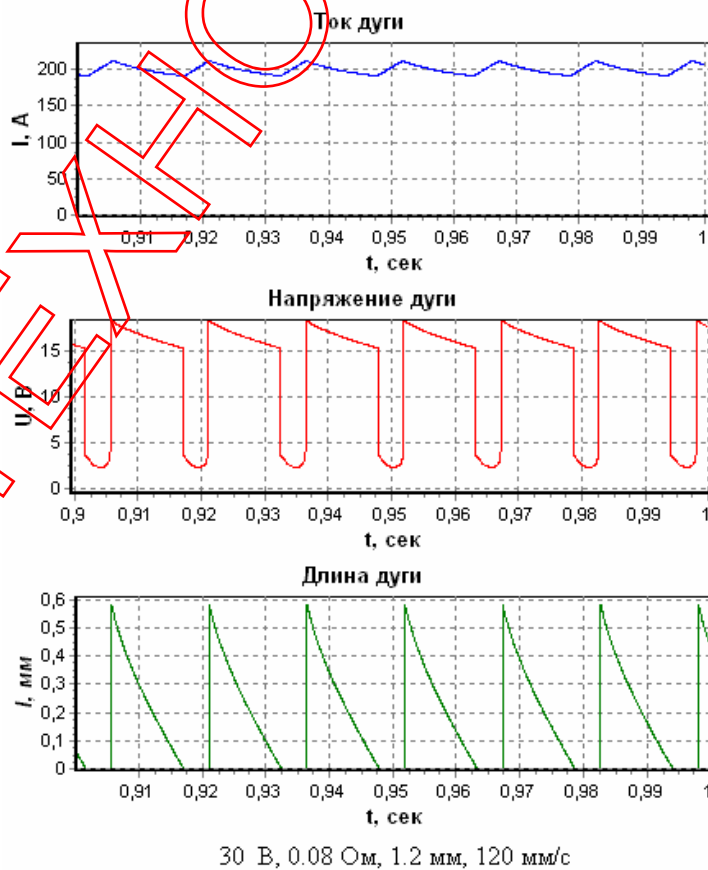


Рис. 7. Результат имитации процесса дуговой сварки с КЗ без активных воздействий на характер каплепереноса

Визуализация модели УКП показала, что при импульсном вводе энергии период каплепереноса, размер капель и максимальная длина дуги существенно больше, чем в непрерывном режиме при отсутствии управляющих воздействий. Однако средние значения тока дуги различаются несущественно, что можно объяснить отсутствием подогрева вылета проволоки при ограничении тока КЗ. Существенное увеличение размера капель и максимальной длины дуги обусловлено увеличением тока дуги в фазе формирования капли, что в свою очередь является следствием повышения U_{xx} источника при импульсном управлении, по сравнению с непрерывным режимом сварки. Увеличение периода переноса капель и длительности КЗ является прямым следствием ограничения максимального размера и массы капель. При замыкании управляющего ключа на весь период КЗ длительность этой фазы несколько больше, чем при подаче импульса тока в заключительной фазе КЗ, создающего электродинамическую силу, которая ускоряет разрыв перемычки между электродной проволокой и каплей.

Анализ технологических преимуществ процесса сварки с УКП.

Главным недостатком неуправляемого процесса дуговой сварки с КЗ является относительно узкий диапазон параметров, в котором реализуется устойчивый процесс переноса электродного металла в сварочную ванну [3,12]. Причиной этого является невозможность регулирования размера капли при касании ее поверхности ванны и величины перемычки (шейки капли) при ее разрыве. При сварке с УКП общая длительность временного интервала формирования капли задана, что позволяет управлять процессом ее формирования, регулируя ток импульса. Если одновременно задавать напряжение на сварочном источнике, то можно дополнительно использовать эффект саморегулирования дуги. Это обеспечивает автоматическую корректировку тока при изменении скорости подачи электродной проволоки, а также ослабляет влияние нестабильности ее подачи на длину дуги, размер и период следования капель. Последнее улучшает стабильность формирования и качество сварных соединений.

Указанные преимущества расширяют область параметров, в которых реализуется процесс сварки с УКП. Ограничением длительности и амплитуды импульса тока в фазе формирования капли является её максимальный размер, при котором капля удерживается на электроде. Максимальное значение U_{xx} источника питания не ограничено, а минимальный ток дежурной дуги ограничен только условием поддержания размеров сформированной капли. Имитация процесса сварки показала, что при управлении микроциклом одним ключом, шунтирующим дуговой промежуток, нет возможности произвольно устанавливать ток КЗ, так как он определяет ток в фазе формирования капли. Существенно уменьшить длительность КЗ, кратковременно размыкая ключ в его завершающей фазе, можно только существенно увеличив ток в фазе формирования капли, для чего нужно увеличить U_{xx} источника с одновременным уменьшением длительности импульса тока.

Выявленные закономерности необходимо учитывать при конструировании различных видов высокотехнологичного оборудования для механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом.

Выводы

1. Для определения параметров управляемого каплепереноса (УПК), которые необходимо учитывать при конструировании различных видов высокотехнологичного оборудования для сварки плавящимся электродом, выполнено имитационное моделирование особенностей переноса капель электродного металла при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка.

2. Имитация процесса сварки с КЗ показала, что при управлении микроциклом сварки нет возможности произвольно устанавливать ток КЗ, так как он определяет фазу формирования капли. Существенно уменьшить длительность КЗ можно только увеличением тока в фазе формирования капли, кратковременным увеличением напряжения источника и синхронным

уменьшением длительности импульса тока.

Список литературы

1. Ланкин Ю.Н. Автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом в CO_2 с периодическими замыканиями дугового промежутка (обзор) // Автоматическая сварка. - 2007. - №1. - С. 3-10.
2. Stava E.K. New surface transfer tension process speeds pipe welding // Pipe Line & Gas Industry. - 1999, Vol.82. - №9. - P. 55-57.
3. Гецкин О.Б., Кудров Н.В., Яров В.Н. Особенности работы сварочных инверторов от автономных источников питания // Сварочное производство. - 2004. - №4. - С.53-55.
4. Лебедев В.К. Тенденции развития источников питания и систем управления (по материалам патентов США) // Автоматическая сварка. - 2004. - №1. - С. 40-48.
5. Патон Б.Е., Лебедев А.В. Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Автоматическая сварка. - 1988. - № 11. - С. 1-5.
6. Mao W, Ushio M. Measurement and theoretical investigation of arc sensor sensitivity in dynamic state during gas metal arc welding // Science and Technology of Welding & Joining. - 1997, Vol.2. - №5. - P. 191-198.
7. Сравнительный анализ технологических возможностей новых установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах / М.В. Карасев, Д.Н. Работинский, В.В. Соляник и др. // Сварщик в России. - 2006. - №2. - С. 33-37.
8. Pendant droplet oscillation during GMAW / B.Y.B. Yudodibroto, M.J.M. Hermans, Y. Hirata, et al. // Science and Technology of Welding & Joining. - 2006, Vol.11 - №3 - P. 308-314.
9. Особенности управляемого тепломассопереноса при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. - 2002. - №7. - С. 6-13.
10. Физико-математическая модель системы «источник питания - дуга» для сварки плавящимся электродом в защитных газах / О.Б. Гецкин, С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, О.П. Витько // Тяжелое машиностроение. - 2008. - №6.
11. Orszach P., Kim Y. C., Horikawa K. Short-circuit transient phenomena in GMA / CO_2 Welding (I): Through-the-wire sensor for feedback torch height control // Transactions of JWRI. - 1997, Vol.26. - №1. - P. 49-67.
12. Устойчивость процесса сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / О.Б. Гецкин, С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, О.П. Витько // Тяжелое машиностроение. - 2008. - №9. - С. 20-23.

АННОТАЦИЯ

Имитационное моделирование особенностей управления переносом капель при сварке с короткими замыканиями

О.Б. Гецкин, С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, О.П. Витько

Для определения параметров управляемого каплепереноса (УПК), которые необходимо учитывать при конструировании различных видов высокотехнологичного оборудования для сварки плавящимся электродом, разработана физико-математическая модель управляемого каплепереноса электродного металла при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка. Модель реализована в компьютерной программе для виртуального воспроизведения особенностей процесса.

Имитационное моделирование процесса сварки с КЗ показало, что при управлении микроциклом сварки нет возможности произвольно устанавливать ток КЗ, так как он определяет фазу формирования капли. Существенно уменьшить длительность КЗ можно только увеличением тока в фазе формирования капли, кратковременным увеличением напряжения источника и синхронным уменьшением длительности импульса тока.

ABSTRACT

Simulation modeling management transfer drops when GMA welding with short circuit

O.B. Getskin, S.I. Poloskov, V.A. Erofeev, O.P. Vitko

To determine the parameters of a Controlled Transfer Drops (CTD) to be considered in the design of various types of high-tech equipment for GMA welding, a physical-mathematical model of managed transfer drops with metal welding electrode with short circuit arc interval. The model is implemented in a computer program for replication features virtual process.

Simulation modeling process of welding with short circuit showed that the management micro cycle welding is not possible to arbitrarily set the current short circuit, because it determines the stage of forming drops. Significantly reduce the duration of short circuit can only increase in the current phase of the formation of drops, short-term increases in voltage source and simultaneous decrease in pulse duration current.

Реферат

статьи: «Имитационное моделирование особенностей управления переносом капель при сварке с короткими замыканиями»,
О.Б. Гецкин, С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, О.П. Витько

При дуговой орбитальной сварке необходимо обеспечить стабильный перенос электродного металла в сварочную ванну и отсутствие брызг металла. Этому требованию удовлетворяет процесс сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. Однако большие значения тока короткого замыкания вызывают разбрызгивание. Современные источники питания с быстродействующим электронным управлением позволяют изменять характеристики микроцикла сварки с короткими замыканиями. Для определения параметров управляемого каплепереноса (УПК), которые необходимо учитывать при конструировании различных видов высокотехнологичного оборудования для сварки плавящимся электродом, разработана физико-математическая модель управляемого каплепереноса электродного металла при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка.

Модель включает систему дифференциальных уравнений, описывающих формирование капли в фазе плавления электрода, зависимость тока и напряжения дуги от изменяющейся длины дугового промежутка, ограничение тока дуги в начале короткого замыкания и подачу импульса тока для сброса капли в конце короткого замыкания. В модели учтено влияние на каплеперенос прогрева вылета электродной проволоки и автоколебаний поверхности сварочной ванны. Сравнение результатов моделирования изменения тока и напряжения дуги с осциллограммами показало их удовлетворительное соответствие.

Визуализация модели в виде компьютерной программы позволила обоснованно определить параметры управляемого каплепереноса (УПК), которые необходимо учитывать при конструировании различных видов оборудования для реализации высокотехнологичных процессов сварки плавящимся электродом.