

На правах рукописи

УДК 621.791:621.643.411

ГЕЦКИН Олег Борисович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСОМ
ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ
И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОМ
СВАРОЧНОМ ИСТОЧНИКЕ**

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары - 2010 г.

Работа выполнена в Научно-производственном предприятии «Технотрон»,
г. Чебоксары. (НПП «Технотрон», ООО)

Научный руководитель - доктор технических наук
ПОЛОСКОВ Сергей Иосифович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЧЕРНЫШОВ Георгий Георгиевич

кандидат технических наук
БРОДЯГИН Владимир Николаевич

Ведущая организация: ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Защита диссертации состоится « ____ » сентября 2010 г. В 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан « ____ » августа 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент

А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время для механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом разрабатываются перспективные способы сварки с целенаправленными воздействиями на каплю электродного металла при ее переходе в сварочную ванну. Их эффективное внедрение сдерживается высокой вероятностью возникновения характерных дефектов формирования сварных соединений из-за характерных возмущений процесса сварки, приводящих к нестабильному переносу электродного металла в сварочную ванну и, как следствие, повышенному разбрызгиванию. Более стабильный перенос обеспечивается при сварке с короткими замыканиями (КЗ) дугового промежутка. Однако допустимый диапазон параметров процесса сварки с КЗ очень узок. Для расширения диапазона параметров и получения стабильного переноса электродного металла разрабатываются специальные источники питания, алгоритмы управления которыми обеспечивают образование капель электродного металла требуемых размеров и гарантированное их перемещение в сварочную ванну. Однако создание таких источников сдерживается из-за отсутствия научно обоснованных рекомендаций по управлению каплепереносом электродного металла. В этой связи исследование особенностей каплепереноса при сварке с КЗ и создание необходимого сварочного оборудования являются актуальными задачами.

Цель работы. Разработать алгоритм управления параметрами переноса электродного металла и реализовать его в инверторном источнике для уменьшения негативного влияния на качество сварных соединений технологических возмущений в процессе механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом.

Объект исследований – процессы сварки плавящимся электродом в защитных газах с КЗ дугового промежутка. Предмет исследований – процесс дуговой сварки с управляемым каплепереносом при КЗ.

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения работы решены следующие задачи:

1. Разработана физико-математическая модель процессов в контуре «источник питания - дуга - плавящийся электрод» для сварки с управляемым переносом капель электродного металла в ванну при КЗ дугового промежутка.
2. Проведена оценка устойчивости к возмущениям процесса сварки с управляемым каплепереносом электродного металла.
3. Создан алгоритм управления параметрами каплепереноса электродного металла и определена оптимальная структура импульсного источника питания дуги, на базе которых разработан инверторный источник, реализующий характерные процессы сварки при выполнении строительных и ремонтных работ на потенциально опасных объектах.

Методы исследования. Выполнены теоретические исследования быстропротекающих процессов при сварке с КЗ методом физико-математического моделирования при различных алгоритмах управления сварочным источником. Результаты исследования проверены по

экспериментальным данным, полученным при записи осциллограмм тока и напряжения дуги, синхронизированных со скоростной киносъемкой дуги (3600 кадров/с). Качество сварных соединений оценивали на основании металлографических исследований.

Научная новизна. Разработана физико-математическая модель процесса дуговой сварки в CO_2 с управляемым каплепереносом электродного металла при периодических коротких замыканиях дугового промежутка.

Установлено, что оптимальным является вариант управляемого процесса переноса капель электродного металла, при котором на стадии формирования капли стабилизируется напряжение источника, а на стадии разрыва шейки между электродом и ванной подаётся импульс тока.

Разработана методика расчёта параметров процесса сварки с управляемыми короткими замыканиями, при которых обеспечивается стабильность и заданные размеры шва.

Практическая значимость работы. На основе полученных результатов разработан инверторный сварочный источник, являющийся составной частью оборудования для автоматической и механизированной сварки.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на Всероссийской научно-технической конференции «Сварка и смежные технологии» (Москва, 2000 г.); на Международной научно-технической конференции «XIII Бенардосовские чтения: Состояние и перспективы электротехнологий» (Иваново, 2006 г.); на I Международной научно-практической конференции «Интеграция науки и производства» (Тамбов, 2008 г.); на IV Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в современном машиностроении» (Пенза, 2008 г.); на IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2008 г.); семинаре кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2009 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Диссертация написана на 165 стр., и содержит 68 рисунков, 16 таблиц, списка литературы из 130 наименований, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность диссертационной работы, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 показано, что к моменту постановки цели работы фундаментальные исследования по повышению качества сварных соединений в различных отраслях промышленности осуществлены Н.П. Алешиным, Б.Е. Патоном, Л.М. Лобановым и др. Значимый вклад в исследование особенностей процессов сварки плавящимся электродом и разработку необходимого

оборудования внесен такими учеными, как А.И. Акулов, Г.Г. Чернышов, Ю.Н. Сараев, А.Г. Потапьевский, Н.Г. Дюргеров, Ю.С. Ищенко, С.И. Полосков, В.Т. Федько, В.А. Букаров, Е. Stava, D. Yapp, M.D. Ngo и др. Накоплен опыт по разработке методик анализа и моделей процессов сварки плавлением (В.А. Судник, В.А. Ерофеев, В.И. Махненко, А.В. Коновалов, Т. Masutani, F. Miyasaka, T. Ohji, S.-J. Na и др.). Из работ Э.А. Гладкова, Э.Л. Макарова, А.Е. Коротынского, Т. Ega, J. Szekely и др. известны новые подходы к управлению процессами сварки и минимизации вероятности возникновения дефектов.

На мировом рынке высокотехнологичное оборудование для сварки трубопроводов представлено фирмами Австрии, Италии, США, Финляндии, Франции. Среди отечественного оборудования следует отметить разработки НИКИМТ (Москва), НПП «Технотрон» (Чебоксары), НПФ «ИТС» (СПб).

Следует отметить, что впервые метод сварки с изменением величины сварочного тока при переходе капли электродного металла в ванну был предложен в 1953 г. М.П. Зайцевым, а систематические исследования и разработки методов управления каплепереносом начали осуществляться в СССР в конце 60, начале 70 гг. прошлого века. Этой проблеме посвящены работы: Патона Б.Е., Дудко Д.А., Зарубы И.И., Чернышова Г.Г., Потапьевского А.Г., Дюргерова Н.Г., других ученых. Однако в те годы они не были реализованы из-за отсутствия сварочных источников с необходимым быстродействием. Перелом наступил после применения в начале 90 гг. фирмой Lincoln electric (США) инверторных источников с изменением по определенному алгоритму параметров процесса сварки для управления переносом капель через дуговой промежуток. С середины 90 гг. данный алгоритм управления, получивший название STT-процесс (Surface Tension Transfer) промышленно применяется для сварки ответственных металлоконструкций. Однако конкретные управляющие воздействия этого и схожих с ним процессов, предложенных позднее фирмами Fronius International GmbH (Австрия), Kemppi (Финляндия) и др., реализуются так называемыми «защитами» программами, что исключает не только их воспроизводство, но даже сравнение эффективности предлагаемых управляющих воздействий.

Вышеизложенное показывает, что для обеспечения управляемого переноса капель электродного металла и создания отечественного источника нужно решить проблему программного обеспечения для регулирования устойчивого перетекания капель малого объема без возможности использования зарубежного опыта. Поэтому был выполнен комплекс работ по адаптации отечественных наработок 60-80 гг. к современным аппаратным средствам и создание отечественного инверторного источника.

Современные исследования быстропротекающих процессов базируются на физико-математическом моделировании их основных стадий. Это в полной мере относится и к процессам сварки. К сожалению, в большинстве моделей электрическая дуга учитывается упрощенно как поверхностный источник теплоты, а сам процесс плавления электродной проволоки зачастую не описывают или учитывают только как поток металла, поступающий в сварочную ванну. Известны модели плавления электродной проволоки и

формирования капли при дуговой сварке без КЗ и переноса электродного металла при естественных КЗ. Однако и в этих моделях не учитывается ряд важных явлений, в том числе влияние изменения размеров капли и вылета электрода, индуктивности сварочной цепи на взаимодействие дуги с источником питания. Поэтому необходимо дополнить существующие модели, учитывающие условия формирования капли, описанием её переноса в ванну при КЗ, а также взаимодействие процесса с импульсным источником питания.

В главе 2 описана физико-математическая модель процессов, происходящих в контуре «источник питания - дуга - электродная проволока» при разных алгоритмах управления каплепереносом электродного металла.

Электрические процессы. В модели учтены индуктивность L , активное сопротивление R источника и цепи питания дуги, а также сопротивление вылета $R(T)$. Ток дуги I_a определяли по вольтамперной характеристике (ВАХ) и зависимостью напряжения дуги $U(I_a, l_a)$ от её длины и тока.

$$U(I_a, l_a) = U_{ak} + l_a \cdot \text{grad} U + \left(1 - \frac{I_m}{I_a}\right), \text{ где } U_{ak} - \text{сумма анодного и катодного}$$

падения напряжений; $\text{grad} U$ – градиент потенциала в столбе дуги; I_m – значение тока КЗ, при котором напряжение дуги минимально.

Сопротивление вылета электрода определяли по распределению температуры в вылете: $R(T) = \frac{1}{\pi r_f^2} \int_0^{L_f} \rho_e(T_f(z)) dz$, где $\rho_e(T_f)$ – зависимость удельного сопротивления материала электрода от его температуры T_f .

Температуру металла в вылете определяли с учётом изменения тока дуги во времени:

$$T_f = \frac{1}{c \rho (\pi r_f^2)^2} \int_{t - \frac{L_e}{v_f}}^t \rho_e(T_f) I_a^2(\tau) d\tau, \text{ где } L_e - \text{длина вылета; } v_f - \text{скорость подачи}$$

электродной проволоки; $\tau = \frac{z}{v_f}$ – время перемещения металла от

токоподводящего наконечника на расстояние z от его торца; ρ – плотность материала электрода; c – удельная теплоёмкость.

Электрические процессы в цепи питания дуги были описаны уравнением, которое связывает токи I и напряжения в источнике и дуговом промежутке с его параметрами по условиям коммутации.

Ток I в цепи источника напряжения U определяли решением уравнения

$$I = \frac{1}{L} \int_0^t (U_0 - U_K - R \max(I, I_0)) dt, \text{ где } U_K - \text{напряжение ключа К; } I_0 - \text{заданный}$$

ток дежурной дуги.

Учитывали изменение напряжения на ключе в течение каждого периода

$$U_K(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \in (t_2, t_3) \cup t \in t_5 \\ U_D & \text{при } t \in t_1 \cup t \in t_4 \end{cases}, \text{ где } U_D - \text{напряжение на дуговом промежутке,}$$

t_D – время коммутации, определяемое по напряжению дуги.

Сопротивление перемычки R_K рассчитывали в соответствии с изменением её формы, описываемым как функция координаты Z_K центра тяжести капли:

$$R_K \approx \rho_K \frac{D}{d_f \sqrt{(D - 2Z_K(t))(D + d_f - 6Z_K(t))}}, \text{ где } \rho_K - \text{удельное сопротивление расплава.}$$

Плавнение проволоки и формирование капли. Размер капли определяется скоростью плавления электродного металла v_f , которая зависит от теплопередачи от дуги к капле. При этом тепловая мощность дуги увеличивает среднюю температуру каплю со скоростью, равной:

$$\frac{dT_K}{dt} = \frac{U_e I_a - \lambda \frac{\pi d_f^2}{D} (T_K - T_L)}{c \rho \frac{\pi D^3}{6}}, \text{ где } U_e - \text{падение напряжения в анодной}$$

области дуги; λ - теплопроводность электродного металла; T_L - температура плавления; T_K - текущая средняя температура капли; D - диаметр капли.

Одновременно в зоне «капля - электродная проволока» возникает тепловой поток мощностью $P_f = \pi d_f^2 \frac{2\lambda}{D} (T_K - T_f)$. В модели учитывали, что этот тепловой поток вызывает дополнительное плавление электродной проволоки с нарастанием текущего объёма капли V_D со скоростью:

$$\frac{dV_D}{dt} = \frac{P_f}{c \rho (T_L - T_f) + H_L}, \text{ где } H_L - \text{удельная теплота плавления.}$$

Текущий диаметр капли определяли по её объёму, $D(t) = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V_D(t)}$.

Формирование дугового промежутка. Длину дугового промежутка l_a определяли как минимальное расстояние между поверхностями сварочной ванны и капли на электроде. Учитывали, что изменение длины дуги определяется скоростью подачи электрода v_f и увеличением диаметра D капли:

$$\frac{dl_a}{dt} = -\frac{dD}{dt} - v_f$$

Перенос капли. Длительность этой фазы цикла определяли по значению длины дуги, взаимосвязанной с расположением центра тяжести капли. Учитывали, что длина дуги в момент КЗ равна нулю. Длительность фазы t_1 переноса капли через дуговой промежуток задаётся, а поглощения её ванной t_2 определяется временными задержками уменьшения длины дуги до нуля в момент КЗ, связанном с изменением расположения центра тяжести капли. Изменение расположения центра масс капли Z_K , вызванное изменением её формы, определяется уравнением: $\frac{d^2 Z_K}{dt^2} = \frac{F_\sigma + F_I}{m_K} + g \cos \alpha$, где $m_K = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho$ -

масса капли; F_σ - сила поверхностного натяжения; F_I - аксиальная составляющая электромагнитной силы, направление и значение которой зависит формы капли расплава; g - гравитационное ускорение; α - угол наклона горелки.

Процесс поглощения капли ванной имеет три характерных значения расположения центра тяжести, которые были определены по соотношениям форм перемычки расплава на разных стадиях формирования, рис. 1.

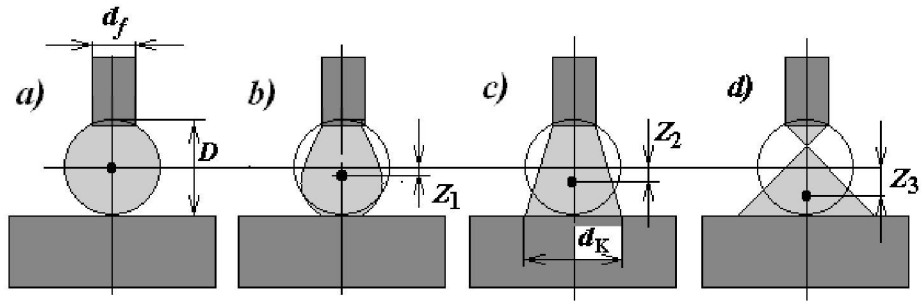


Рис. 1. Изменение размеров и расположения центра тяжести капли при КЗ

В начале КЗ, рис. 1а, после образования капли оптимальных размеров, «успокоения» ее плазменными потоками и газодинамическим воздействием дуги, она имеет сферическую форму диаметром D , соизмеримую с размерами перемычки между торцом проволоки и ванной. Вследствие малого радиуса кривизны поверхности в точке контакта капли со сварочной ванной возникает большая сила поверхностного натяжения. По мере перетекания расплава в ванну диаметр контакта d_k перемычки расплава достигает значения, равного диаметру электрода d_f , рис. 1б. С этого момента изменяется направление действия аксиальной составляющей электродинамической силы, которая с этого момента способствует переходу капли в сварочную ванну. Центр тяжести в этот момент смещён от начального положение на расстояние $z_1 \approx \frac{D}{6\sqrt{2}}$ и перемычка приобретает равновесную форму, близкую к усечённому конусу, рис. 1с. Центр тяжести при этой форме поверхности перемычки расположен на расстоянии $z_2 \approx \frac{D}{6} \left(1 - \frac{d_f}{D} \right)$. Дальнейшее движение расплава продолжается под действием силы инерции, преодолевающей сопротивление силы поверхностного натяжения. В момент разрыва форма перемычки близка к форме двух конусов, рис. 1д. Центр тяжести перемычки к этому моменту смещён относительно исходного положения на расстояние $z_3 \approx \frac{D}{6} \left(1 + \frac{d_f}{D} \right)$.

Описанные допущения и упрощения позволили оценить изменение аксиальных составляющих сил, действующих на перемычку, в зависимости от смещения координаты центра тяжести: электродинамической силы $F_I \approx kI_D^2 \left(1 - \frac{Z_3 - Z_K(t)}{Z_3 - Z_1} \right)$ и силы поверхностного натяжения $F_\sigma = \pi D \sigma \left(1 - \frac{Z_K(t) - Z_2}{Z_3 - Z_2} \right)$.

Совместное решение этой системы уравнений позволило виртуально воспроизвести перенос капель с торца электрода в ванну при КЗ, рис. 2.

Одновременно результаты моделирования показали, что период следования последовательности КЗ более стабилен при осуществлении дополнительных управляющих воздействий в ходе реализации импульсного процесса сварки. Кроме того, при подобном импульсном управлении процессом сварки ток дуги, временная стабильность переноса капель с торца электрода в сварочную ванну, допустимая длина дуги и сам размер капель существенно больше, чем при сварке в непрерывном режиме при отсутствии управления.

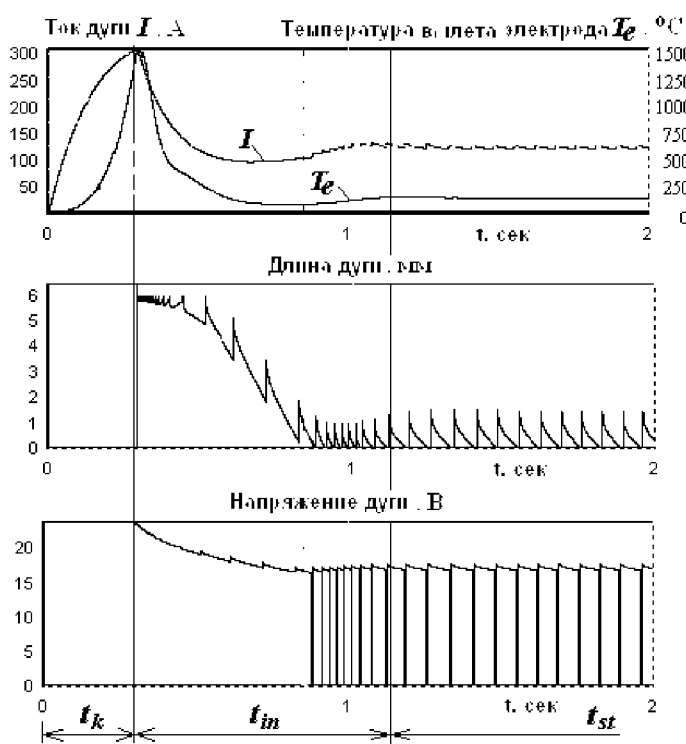


Рис. 2. Результаты моделирования стадий процесса сварки в CO_2 с выходом на стабильный режим. Диаметр $d_f=1,2$ мм, $V_f=90$ мм/с, $U_0=27$ В, $R=0,06$ Ом, $L=2$ мГн

В табл. 1 приведены опытные данные, сопоставленные с результатами компьютерной имитации.

Подобные результаты связаны с отсутствием подогрева вылета током при ограничении тока КЗ. Для подтверждения полученных результатов данные моделирования, сравнили с результатами сварки натурных образцов, а также собственные данные ранее проведенных работ. Кроме того, для сравнения использовали опубликованные результаты исследований процесса сварки с КЗ. При выполнении опытов использовали стендовый источник питания, который позволял изменять амплитуду и длительность импульсов тока на стадиях образования капли, а также длительность пауз между импульсами, в которых горит дежурная дуга.

Таблица 1.

Результаты опытов и имитации процесса дуговой сварки в CO_2

Параметры процесса				Результаты опытов			Результаты имитации		
d_e , мм	v_f , мм/с	U_0 , В	l_f , мм	I_D , А	U_D , В	τ , мс	I_D , А	U_D , В	τ , мс
0,8	40	32	10	60	26	14	51	24	15,2
0,8	93	32	10	120	24	9.8	107	22	9,9
1,0	86	48	12	115	22	11	111	24	12,5
1,2	92	48	12	135	21	10	172	22	11,2
1,6	78	48	16	280	20	11	260	21	13,1
1,6	87	48	14	280	22	13	290	21	14,9

Приведенные данные подтверждают, что расчётные значения тока и напряжения дуги и период следования капель удовлетворительно совпадают с опытными значениями, полученными по результатам скоростной киносъёмки дугового промежутка, рис. 3, и осциллограмм тока и напряжения дуги.

В табл. 2 приведены сравнительные данные о времени образования капли при сварке с КЗ. Как свидетельствуют приведенные результаты, моделирование адекватно воспроизводит стадию образования капли, наблюдаемую при

выполнении опытов.

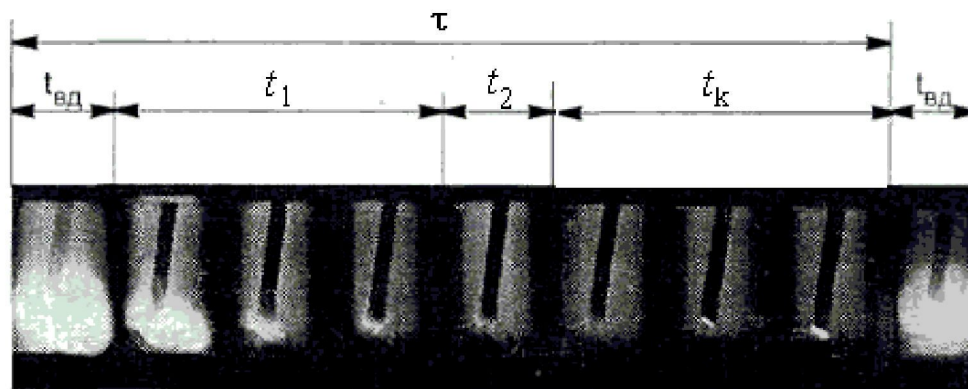


Рис. 3. Реальный цикл управляемого переноса капли через дуговой промежуток

Таблица 2.

Сравнение опытных и расчётных значений периода цикла τ и времени образования капли $t_{ок}$

№ оп.	d_f , мм	I_a , А	U_a , В	U_0 , В	V_f , мм/с	Измерено		Рассчитано	
						τ , мс	t_1 , мс	τ , мс	t_1 , мс
1	1,6	280	20	48	77	11,1	9,0	12,1	9,5
2		280	22	48	87	13,1	7,4	12,8	8,2
3	1,2	135	21	48	92	10,0	9,3	11,0	9,5
4	1,0	115	22	48	86	10,6	8,7	11,5	9,0
5	0,8	60	21	48	40	14,3	12,9	14,5	12,8
6		95	20	48	70	10,1	8,5	11,0	9,0
7		120	19	48	93	9,5	7,9	9,8	8,1

В главе 3 исследованы закономерности управляемого каплепереноса электродного металла в процессе сварки плавящимся электродом с учетом возмущений внешней среды и необходимых управляющих воздействий для их компенсации.

Устойчивость процесса. Известно, что при изменении ряда параметров процесса сварки взаимодействие источника питания с процессом плавления электродной проволоки оказывается неустойчивым, что выражается в возникновении хаотических замыканий и обрывов дуги, приводящих к повышенному разбрызгиванию. Поэтому были определена область устойчивых режимов сварки, границы которой представлены на рис. 4. Исследование выполнили как для обычного, так и импульсного источника питания.

При исследовании обычного процесса варьировали напряжение холостого хода источника питания, наклон ВАХ источника и индуктивность сварочной цепи. Установлено, что при использовании источника питания дуги с жесткой ВАХ и достаточно большим напряжением холостого хода U_0 обеспечивается капельный перенос без КЗ и эффективное саморегулирование длины дуги, рис. 4а (Стальная проволока диаметром 1,2 мм, скорость подачи проволоки 60 мм/с, защитный газ - CO_2 , напряжение источника $U_0 = 20$ В, угол наклона ВАХ $= 0,01$ В/А, индуктивность цепи $L = 4$ мГн.). Для получения процесса сварки с КЗ необходимо уменьшить напряжение холостого хода U_0 .

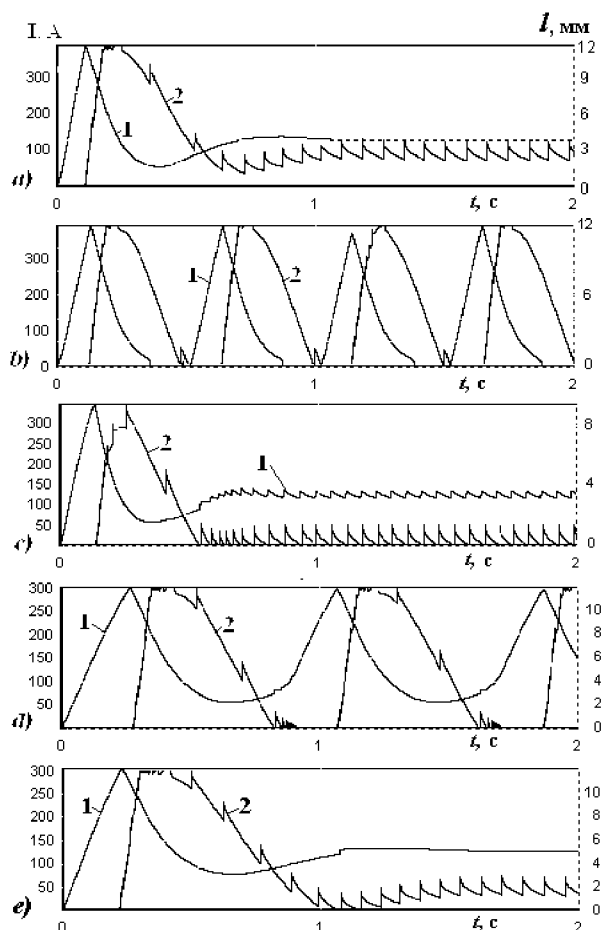


Рис. 4. Результат компьютерной имитации изменения тока (1) и длины (2) дуги в начале процесса сварки.

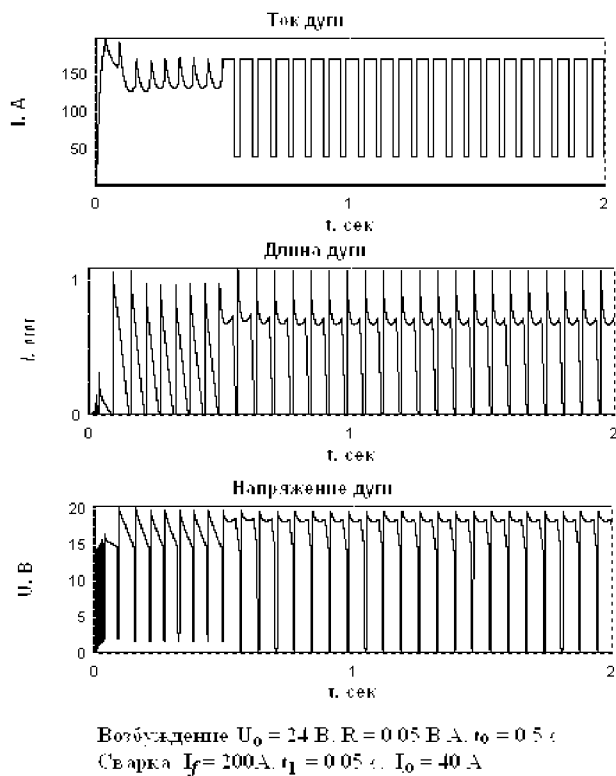


Рис. 5. Изменение параметров дуги при возбуждении процесса

Однако при жесткой ВАХ возникает характерная неустойчивость процесса, рис. 4б ($U_0=18$ В, $R=0,01$ В/А, $L=4$ мГн.). Увеличение наклона ВАХ источника позволяет получить устойчивый процесс сварки с КЗ, рис. 4с ($U_0=20$ В, $R=0,03$ В/А, $L=10$ мГн.). Но если сварочная цепь имеет большую индуктивность, то процесс сварки вновь оказывается неустойчивым, рис. 4д ($U_0=20$ В, $R=0,03$ В/А, $L>10$ мГн.). Это наблюдается только при сварке с КЗ, при тех же параметрах процесс сварки без КЗ устойчив, рис. 4е. ($U_0=22$ В, $R=0,03$ В/А, $L>10$ мГн.).

Одновременно определили допустимые значения индуктивности L сварочной цепи зависимости от U_0 и наклона ВАХ.

Известно, что при реализации импульсных процессов сварки плавящимся электродом затруднено начальное возбуждение дуги.

Поэтому процесс следует начать при жесткой ВАХ источника, задав напряжение холостого хода источника 22...26 В, но не ограничивая при этом значение сварочного тока, рис. 5. После стабилизации в течении 0,5 с напряжения холостого хода включается импульсное управление с заданными токами импульса и паузы. Затем, через 0,2...0,5 с, что соответствует времени прогревания вылета до температуры плавления и гарантированному возбуждению дуги, система управления источника автоматически переключает его на режим сварки с управляемым каплепереносом электродного металла через дуговой промежуток.

Напряжение холостого хода источника тока дежурной дуги должно быть очень большим (50...60 В), что бы исключить случайные обрывы дуги. В этом случае потеря устойчивости, сопровождающаяся обрывами дуги, полностью исключена. Однако при стабилизации напряжения источника при неудачно выбранных параметрах сварки все же наблюдаются признаки неустойчивости, характеризующиеся нерегулярностью каплепереноса с скачкообразными изменениями длины дуги. Это явление возникает при параметрах, при которых традиционный процесс сварки неустойчив, т.е. при жесткой ВАХ источника.

Исследование влияния параметров процесса с управляемыми КЗ на перенос электродного металла. При строительных и монтажных работах с использованием сварки основными возмущениями, является нестабильность входного напряжения, а также индуктивность и сопротивление цепи питания дуги, скользящий контакт с электродной проволокой при подводе сварочного тока. Исследования различных алгоритмов управления КЗ показало перспективность двух вариантов управления каплепереносом в процессе сварки с минимизацией возможных возмущений.

В первом варианте управляющим воздействием является напряжение импульса, определяющее длину и напряжение дуги, а также скорость подачи электродной проволоки, определяющая ток дуги.

Во втором варианте задаётся ток импульса, а длина дуги регулируется изменением скорости подачи электродной проволоки.

Установлено, что оба варианта управления позволяют компенсировать возникающие возмущения изменением длительности стадии между после импульса тока до момента КЗ. При стабилизации тока скорость подачи электродной проволоки в значительной степени влияет на длительность стадии образования капли оптимальных размеров, а, следовательно, и весь период каплепереноса. Это существенно уменьшает диапазон регулирования скорости подачи электрода без соответствующей коррекции тока импульса. При стабилизации напряжения скорость подачи электродной проволоки определяет ток импульса. В этом случае период каплепереноса изменяются существенно меньше, чем при стабилизации тока. Это обеспечивает возможность регулирования скорости подачи электрода в широком диапазоне значений.

Важным дестабилизирующим фактором, определяющим характер каплепереноса, является вариация сопротивления цепи питания электрической дуги от 0,025 до 0,05 Ом. В варианте стабилизации тока импульса подобные отклонения сопротивления полностью компенсируются источником и не вызывают изменения режима сварки. При стабилизации напряжения изменение сопротивления вызывает изменение длины дуги ($\approx \pm 0,25$ мм) со снижением мощности импульса тока. Данные возмущения компенсирует изменение длительности стадии успокоения капли. Нарушение каплепереноса возможно только при увеличении сопротивления цепи питания дуги (свыше 0,1 Ом), или предельно малых значениях сопротивления ($< 0,02$ Ом) из-за неустойчивости процессов в контуре «источник-дуга».

Установлено, что при импульсной сварке пространственное положение слабо влияет на размер формирующихся капель ввиду высокой стабильности

энергии импульса тока. В потолочном положении устойчивый перенос капли при КЗ обеспечивается силой поверхностного натяжения до диаметра капли 2 мм, а при подаче дополнительного импульса тока – до 2,7 мм. Результаты исследований показали, что импульсные процессы сварки обладают способностью саморегулирования, но при стабилизации напряжения импульса возмущения автоматически компенсируются амплитудой тока, а при стабилизации тока – длительностью фазы успокоения капли. Длительность этой фазы нельзя уменьшить до нуля, в то время как для амплитуды тока такого очевидного ограничения нет. Поэтому вариант стабилизации тока импульса требует более точного определения параметров процесса, чем вариант стабилизации напряжения, но его преимуществами являются большая устойчивость и меньшая чувствительность к нестабильности электрического сопротивления сварочной цепи.

Определение допустимой мощности процесса при сварке в потолочном положении. Сварочная ванна в потолочном положении удерживается силой поверхностного натяжения, которая зависит от площади и кривизны поверхности ванны. Имеется критический объём сварочной ванны, при превышении которого ванна не удерживается в потолочном положении. Минимальный критический объём ванны имеет место при сквозном проплавлении при выполнении корневого прохода на U-образной разделке. Мощность процесса, при которой формируется ванна такого объёма равна:

$$P < \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\rho g} \sqrt{\frac{D}{2h}} H v_w + \lambda \frac{2T_L}{D} \pi D s, \text{ где } H = \left(\frac{T_L + T_V}{2} c \rho + H_L \rho \right) - \text{средняя объёмная}$$

энтальпия расплава в сварочной ванне; T_L , T_V – температуры плавления и кипения; H_L – энтальпия плавления; c – удельная теплоёмкость металла; s – толщина свариваемых кромок; σ – поверхностное натяжение; ρ – плотность металла; g – гравитационное ускорение. Соответственно скорость подачи

проволоки $v_f = \frac{2P}{\pi d_f^2 H}$, а поперечное сечение наплавки $S_f = \frac{\pi d_f^2 v_f}{4 v_w}$,

Длительность стадий микроцикла сварки. Если считать, что оптимальный диаметр каплей не должен превышать 1,5 диаметра электрода, то соответственно период τ следования импульсов будет равен $\tau \approx 3 \frac{d_f}{v_f}$, а

длительность t_2 фазы успокоения капли равна $t_2 = \frac{l_a}{v_f}$. Длительность стадии

успокоения зависит от диаметра электрода $t_2 \approx \frac{1.5 d_f}{v_f}$, а стадии КЗ определяются

временем перехода капли в сварочную ванну $t_k \approx \sqrt{\frac{d_f m_k}{F_\sigma}} = \sqrt{0.5 d_f^3 \frac{\rho}{\sigma}}$.

Амплитуда импульса тока на стадии формирования капли. Значения импульса тока определяется мощностью, необходимой для плавления проволоки, поданной за время цикла, и нагревания металла до температуры капли. Так как нагрев происходит в заданное время импульса, то необходим ток

$$I_a = \frac{Q_f}{U_f t_1} = \frac{\tau}{t_1} \frac{\pi d_f^2}{4 U_f} v_f \rho \left(c \frac{T_L + T_V}{2} + q_L \right), \quad \text{где } U_f - \text{ анодное (или катодное)}$$

напряжение в пятне дуги у электрода.

Оптимальное значение тока дуги на стадии успокоения капли.

Значение тока дуги на стадии успокоения должно быть достаточным для стабильного горения дуги и обеспечивать поддержание размера капли, которую охлаждает отток теплоты в электрод. Мощность этого теплового потока невелика и может быть уравновешена небольшими значениями тока стабилизации, который в большинстве случаев не превышает 15 А.

Ток импульса при КЗ. Для исключения риска «приморзания» капли, обусловленного вероятностью ее остывания ещё до перетекания в сварочную ванну, целесообразно прохождение через каплю «дежурного» импульса тока:

$$I_k > \sqrt{\frac{F_f \pi d_f}{6 \rho_e}}, \quad \text{где } \rho_e - \text{ удельное электрическое сопротивление расплава.}$$

Для ускорения переноса электродинамической силой амплитуду тока КЗ целесообразно значительно увеличить, но при этом он не должен нагревать перемычку жидкого металла между торцом электрода и самой каплей до температуры кипения. Ток импульса КЗ не должен превышать значения:

$$I_k < \frac{\pi d_f^2}{16} \sqrt{\frac{c \rho}{\rho_e t_{ik}} \frac{T_V - T_L}{2}}.$$

В табл. 3. приведены результаты расчёта параметров цикла управляемого переноса капли при сварке проволоками разного диаметра.

Таблица 3.

Расчётное значение параметров цикла сварки с УКП

Параметры		Длительность стадий, мс				Ток дуги, А		КЗ	
d_f , мм	v_f , мм/с	τ	t_2	T_k	t_1	I	I_0	I_k , А	Q_k , Дж
0,8	60	40	20	$\approx 1,4$	18	107	6,5	170-228	1,6
	120	20	10		8	232			
1,2	50	72	36	$\approx 2,6$	24	200	10,2	256-378	5,5
	75	48	24		21	314			
	100	36	18		15	436			
1,6	40	120	60	$\approx 4,2$	56	285	13,1	342-542	13,1
	60	80	40		36	442			
	80	60	30		28	614			

Рекомендации по проектированию оборудования для дуговой сварки с управляемым переносом электродного металла. Установлено, что эффективное и устойчивое саморегулирование при сварке с КЗ обеспечивается при малой индуктивности и небольшом наклоне ВАХ, но при этом требуется более точная поддержка основных параметров процесса. Снижение требований к такой поддержке возможно только при отдельном управлении каплепереносом на стадиях образования капли и ее перехода в ванну при КЗ.

В главе 4 представлены средства промышленной реализации процессов с управляемым каплепереносом электродного металла. Результаты исследования позволили определить не только параметры оригинального процесса сварки плавящимся электродом, получившим название «сварка с управляемым каплепереносом (УКП) электродного металла», но и сформулировать требования к структуре, рис. 6, а также техническим характеристикам многофункционального инверторного источника для сварки.

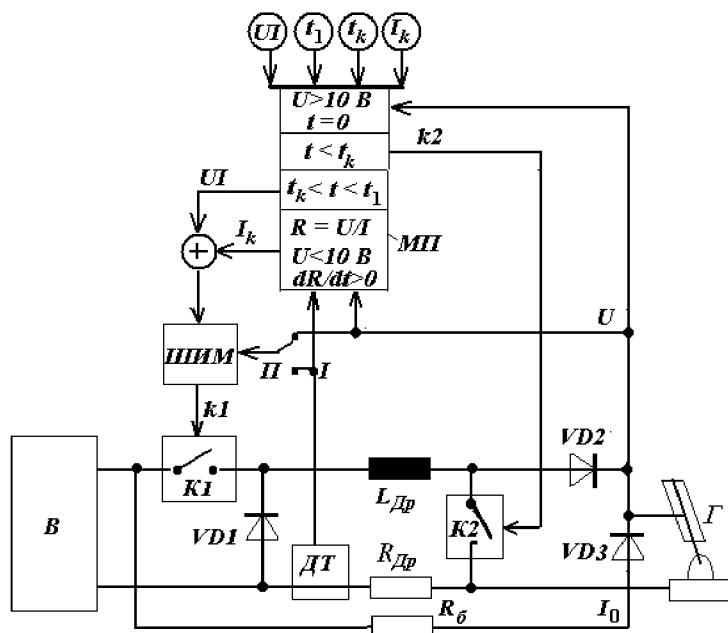


Рис. 6. Структура источника питания дуги для сварки с УКП. *В* - выпрямитель, *K1, K2* - транзисторные ключи, *ШИМ* - широтно-импульсный модулятор, *МП* - микропроцессор, *ДТ* - датчик тока, *VD1...VD3* - диоды, *L_{др}*, *R_{др}* - индуктивность и активное сопротивление сглаживающего дросселя, *R_б* - ограничитель тока дежурной дуги, *Π* - переключатель режима стабилизации

Установлено, что при возбуждении дуги целесообразно использовать режим стабилизации напряжения, а в импульсный режим переходить после стабилизации дуги. На стадии формирования капли предпочтительна стабилизация напряжения источника. Определены предельные индуктивность и наклон вольтамперной характеристики, диапазоны значений тока и длительности разных стадий процесса. Разработан алгоритм переключения стадий по напряжению дуги и сопротивлению дугового промежутка.

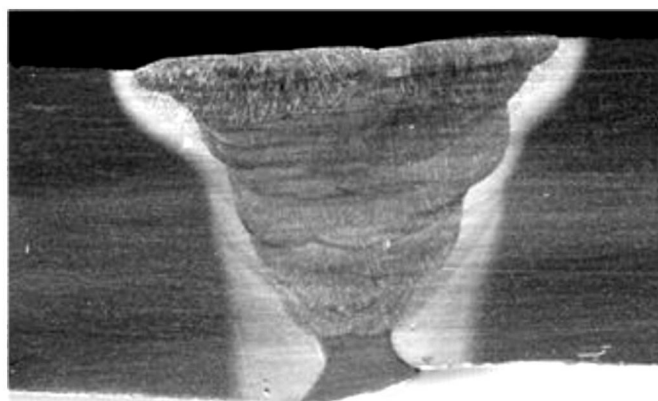
На основе результатов исследований разработан многофункциональный сварочный источник для механизированной и автоматической сварки. Основой источника питания дуги ДС-400.33-УКП стал двухтактный инвертор, выполненный на IGBT-модулях. Выходные параметры источника обеспечивает микропроцессорная система управления, которая позволяет контролировать и изменять параметры сварочной дуги более 1000 раз в секунду. При разработке источника учитывали особенности эксплуатации в полевых условиях и питания от дизельных генераторов.

В источнике, наряду со сваркой с УКП, предусмотрена возможность осуществления функций по управлению процессами сварки короткой дугой с естественными КЗ и импульсно-дуговой сварки длинной дугой. Источник обладает малой индуктивностью и регулируемым углом наклона ВАХ, что обеспечивает снижение чувствительности процесса сварки к изменениям скорости подачи электродной проволоки. Для демпфирования колебаний капли источник обеспечивает плавный спад заднего и нарастание переднего фронтов

импульса тока. Размыкание шунтирующего ключа происходит только при скорости роста сопротивления $dR/dt > 0$ и уменьшения напряжения дугового промежутка $U_a < 10$ В. Если датчики не фиксируют КЗ, то процесс УКП переходит в импульсно-дуговую сварку. Оперативная информация об изменении напряжения дуги, но уже для исключения возможных КЗ, используется при реализации процессов импульсно-дуговой сварки.

Разработанный источник является составной частью автомата блочно-модульной конструкции для орбитальной сварки УАСТ-1 и полуавтомата ПАМ-4.33. Промышленное использование разработанного оборудования показало, что оно обеспечивает требуемое качество сварных соединений, с уменьшением на 10-12% расход электродной проволоки при сварке.

Характерный макрошлиф сварного соединения трубопровода показан на рис. 7, а результаты механических испытаний и коэффициент разбрызгивания электродного металла γ приведены в табл. 4.



Полученные результаты показали, что потери электродного металла при УКП много меньше (0,5...0,7%), чем это имеет место при традиционном процессе сварки в углекислом газе (8...14%).

Рис. 7. Макрошлиф сварного шва трубопровода диаметром 1220х15,7 мм, сталь прочностного класса К60

Таблица 4.

Результаты механических испытаний металла шва и коэффициент разбрызгивания при сварке с источником ДС-400.33-УКП

Проход	σ_T , МПа	σ_B , МПа	ϵ , %	δ , %	KCV, -20 °C Дж/см ²	γ , %
Корневой	510	630	31	66	54,4	0,5
1-й «горячий»	507	612	29,2	65,4	50,6	0,7
2-й и последующие	503	609	23,7	63,4	85,5	0,7
Облицовочный	540	625	25,7	63,6	115,3	1,1

Экономический эффект от внедрения оборудования для автоматической и механизированной сварки с многофункциональными сварочными источниками ДС 400.33-УКП на объектах ОАО «Газпром», ОАО «АК «Транснефть» и ОАО «Стройтрансгаз» составил более 12 млн. руб. в год (Цены 2009 г.).

Основные выводы и результаты

1. В настоящее время для механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом в защитных газах разрабатываются перспективные процессы сварки с целенаправленными воздействиями на каплю электродного

металла при переходе ее в сварочную ванну. Однако практическая реализация таких процессов сдерживается отсутствием методик определения условий, при которых достигается стабильный перенос электродного металла с минимальным разбрызгиванием.

2. Показано, что компьютерное моделирование на основе разработанной физико-математической модели системы «источник питания - дуга - электродная проволока» для дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах, воспроизводящая процессы переноса капель при КЗ дугового промежутка, и созданная компьютерная программа адекватно воспроизводят результаты опытов при сварке в CO_2 проволоками сплошного сечения при варьировании их диаметра и скорости подачи.

3. При сварке с естественными КЗ, перенос электродного металла с минимальным разбрызгиванием стабилен только в очень узком диапазоне значений напряжения источника питания, индуктивности и наклона вольтамперной характеристики источника, вне которого система «источник питания - дуга - электродная проволока» теряет устойчивость, так как КЗ инициируют импульсы тока, усиливающие колебательный процесс в силовом контуре.

4. Управляемый каплеперенос (УКП) электродного металла при сварке с КЗ устойчив вследствие возможности саморегулирования в более широком диапазоне параметров, так как стабилизация тока импульса обеспечивается за счёт изменения длительности фазы успокоения капли, а стабилизация напряжения на стадии формирования капли – за счёт скорости его возрастания и спада.

5. Анализ соотношений параметров процесса сварки с УКП показывает, что наилучшее саморегулирование каплепереноса достигается при равных длительностях стадий формирования и успокоения капли, причем минимальные значения сварочного тока на стадиях успокоения капли и КЗ определяется условием поддержания неизменным объёма капли, а наибольшее значение амплитуды импульса тока при КЗ ограничено условием недопустимости нагрева металла в перемычке до температуры кипения.

6. Характерные проблемы обеспечения надёжного начального возбуждения дуги при сварке в CO_2 с УКП электродного металла успешно решены путем ее возбуждения в процессе непрерывного процесса сварки длинной дугой на жесткой ВАХ источника, с последующим переходом к управляемому каплепереносу после достижения устойчивого горения дуги.

7. Разработаны алгоритм управления сваркой с УКП и оптимальная структура импульсного источника питания на основе быстродействующего инвертора, управляемого микропроцессорным устройством, которые реализованы в многофункциональном инверторном источнике ДС 400.33 УКП, входящим в состав установки УАСТ-1 и полуавтомата ПАМ-4.33.

8. Осуществлено опытно-промышленное внедрение установок УАСТ-1 и полуавтоматов ПАМ-4.33 с многофункциональными сварочными источниками ДС 400.33-УКП на объектах ОАО «Газпром», ОАО «АК «Транснефть» и ОАО «Стройтрансгаз» при сварке неповоротных стыков труб с выполнением

корневого прохода сплошной проволокой в CO_2 и заполнения разделки порошковыми проволоками, которое показало, что разработанное оборудование обеспечивает стабильно высокое качество сварных соединений с минимальным разбрызгиванием электродного металла.

Экономический эффект от внедрения оборудования для автоматической и механизированной сварки с многофункциональными сварочными источниками ДС 400.33-УКП составил более 12 млн. руб. в год (Цены 2009 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Агарев В.Н., Гецкин О.Б. Применение метода регуляции для численной обработки результатов вольт-фарадных измерений // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Физика твердого тела. - 1998. - Вып. 2. - С. 5-9.

2. Управление переносом капли при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С.И. Полосков [и др.] // Сварочное производство. - 2001. - №6. - С. 6-9.

3. Особенности управляемого тепломассопереноса при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С.И. Полосков [и др.] // Сварочное производство. - 2002. - №7. - С. 6-13.

4. Гецкин О.Б., Яров В.Н., Кудров И.В. Инверторный источник ДС 250.33 для сварки покрытыми электродами // Сварочное производство. - 2004. - №2. - С. 19-21.

5. Гецкин О.Б., Кудров И.В., Яров В.Н. Особенности работы сварочных инверторов от автономных источников питания // Сварочное производство. - 2004. - №4. - С. 53-55.

6. Физико-математическая модель системы «источник питания - дуга» для сварки плавящимся электродом в защитных газах / О.Б. Гецкин [и др.] // Тяжелое машиностроение. - 2008. - №6. - С. 18-20.

7. Гецкин О.Б. Создание автомата блочно-модульной конструкции для орбитальной сварки магистральных трубопроводов // Сварка и диагностика. - 2008. - №6. - С. 19-23.

8. Устойчивость процесса сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / О.Б. Гецкин [и др.] // Тяжелое машиностроение. - 2008. - №9. - С. 20-23.

9. Имитационное моделирование особенностей управления переносом капель при сварке с короткими замыканиями / О.Б. Гецкин [и др.] // Технология машиностроения. - 2008. - №10. - С. 25-29.

10. Гецкин О.Б., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Моделирование процесса переноса электродного металла при сварке с короткими замыканиями // Автоматическая сварка. - 2009. - №2. - С. 16-21.

11. Гецкин О.Б., Гецкин Б.Л., Полосков С.И. Создание многофункционального инверторного источника для сварки с управляемым каплепереносом электродного металла // Тяжелое машиностроение. - 2009. - №2. - С. 16-20.