

СОЗДАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНВЕРТОРНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ СВАРКИ С УПРАВЛЯЕМЫМ КАПЛЕПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

О.Б. Гецкин, инж, Б.Л. Гецкин, инж. (НПП «Технотрон»)
С.И. Полосков, д-р техн. наук (ОАО «Стройтрансгаз»)

Введение. Выполненные ранее исследования [1,2] показали, что управляемый каплеперенос (УКП) электродного металла расширяет технологические возможности процесса сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. Это позволяет рекомендовать УКП при реализации таких высокотехнологических процессов, как автоматическая орбитальная сварка нефтегазопроводов больших диаметров или толстостенных трубопроводов, применяемых на тепловых и атомных станциях. Однако процесс сварки с УКП возможен только при использовании специализированных источников для сварки с высокими динамическими характеристиками.

Цель работы - рассмотрение комплекса вопросов по созданию многофункционального источника, обеспечивающего УКП электродного металла при сварке плавящимся электродом.

В соответствии с системным подходом к решению проблем создания многофункционального источника, обеспечивающего УКП электродного металла, были сформулированы следующие группы вопросов:

- определение технологических требований к сварочному источнику;
- выбор оптимальных схмотехнических решений и элементной базы;
- реализация технологических требований к продукции;
- удовлетворение требований потребителей к качеству и техническим возможностям продукции.

Определение технологических требований к источнику. Для определения технологических требований была разработана [3] физико-математическая модель системы «источник питания - дуга» для дуговой

сварки плавящимся электродом в защитных газах. Модель позволяет учитывать характер тепломассопереноса капель электродного металла в зависимости от вольтамперной характеристики (ВАХ) процесса, с допущением о безинерционной зависимости напряжения дуги от сварочного тока в диапазоне от напряжения холостого хода U_{xx} источника до короткого замыкания дуги (КЗ). В этом случае ВАХ источника может быть представлен, рис. 1, в виде линейного рабочего участка, который ограничен U_{xx} и током короткого замыкания I_{max} .

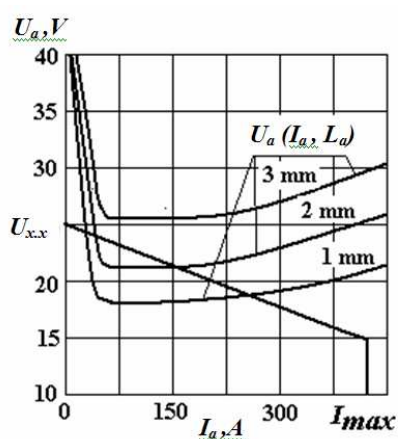


Рис. 1. Вольтамперные характеристики дуги $U_a(I_a, l_a)$ длиной $l_a = 1; 2; 3$ мм и энергетические ограничения (U_{xx} , I_{max}) источника питания

Для реализации численного решения уравнений модели разработана специальная компьютерная программа, воспроизводящая характерные явления при дуговой сварке: неустойчивость процесса при возмущениях по скорости подачи электродной проволоки, периодические замыкания дугового промежутка каплей при низком напряжении сварочной дуги и изменения в характере тепломассопереноса при повышении напряжения источника сварочного тока. Использование модельного, а не реального, времени в программе позволило анализировать процессы в замедленном темпе, и даже останавливать процесс для изучения характерных явлений в какой-то момент времени. Полученные данные позволили установить ряд новых зависимостей характерных процессов сварки плавящимся электродом.

Компьютерное моделирование процесса сварки плавящимся электродом с КЗ показало, что устойчивость процесса в значительной степени определяется углом наклона вольтамперной характеристики сварочного источника, определяемого динамическим сопротивлением R и

индуктивностью L цепи питания дуги [4]. При этом в процессе управления микроциклом отсутствует сама возможность произвольно устанавливать ток КЗ, так как он определяет стадии формирования капли. Было определено, что существенно уменьшить длительность КЗ можно только увеличением тока в фазе формирования капли, кратковременным увеличением напряжения источника, синхронизированным с длительностью импульса тока.

Результаты исследований показали, что увеличение U_{xx} и угла наклона ВАХ источника расширяют границы ограничений на параметры процесса, при которых обеспечивается устойчивый процесс сварки с КЗ. Однако при использовании типовых источников для сварки плавящимся электродом в CO_2 , имеющих индуктивность 10...20 мГн, устойчивый процесс сварки с КЗ может быть обеспечен только при значительном наклоне (0,08...0,2 В/А) ВАХ источника и напряжении U_{xx} , превышающем 30...50 В.

Визуализация модели подтвердила данные работы [5] и выполненных ранее собственных исследований, что возмущения, связанные с изменением скорости подачи электродной проволоки, приводят либо к нарушениям формирования сварочной ванны, либо к уменьшению площади пятна первичного контакта капли со сварочной ванной. Последствиями могут быть повышенное разбрызгивание, дефекты формирования шва, оплавление и выход из строя токоподвода горелки. Так как типовые сварочные источники для сварки плавящимся электродом обеспечивают устойчивый процесс сварки в очень узком диапазоне значений U_{xx} и электрического сопротивления сварочной цепи, то требования по скорости V_3 подачи электродной проволоки ужесточаются настолько, что допустимые отклонения соизмеримы со значениями погрешности, вносимой случайными факторами [6]. Эти обстоятельства исключают возможность использования типовых источников и электроприводов без датчиков обратных связей при реализации высокотехнологичных процессов сварки.

Поэтому на НПП «Технотрон» было принято решение разработать специализированный сварочный источник с динамическим изменением

энергетических характеристик для реализации управляемого каплепереноса электродного металла. Наличие современных средств исследования быстропротекающих явлений [3,4,6] позволило сформулировать технологические требования к источникам для реализации процессов орбитальной сварки с УКП.

Выбор оптимальных схемотехнических решений и элементной базы. Реализация быстропротекающих процессов стала возможной благодаря появлению в современной силовой электронике мощных, практически идеальных ключей на базе транзисторов (MOSFET, IGBT) или полностью управляемых тиристоров (GTO, IGCT, SGCT) [7]. Однако для реализации процессов УКП наиболее перспективно применение IGBT-модулей на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором. Такие транзисторы обладают не только удачным сочетанием свойств, в том числе малой мощностью управления, прямоугольной областью безопасной работы, способностью работать параллельно без выравнивающих элементов, малым падением напряжения в открытом состоянии, высоким предельно-допустимым напряжением, но и высокой скоростью коммутации с частотой переключений более 150-200 кГц. Это сделало IGBT-модули идеальным силовым ключом. В этой связи основной схемы (рис. 2) специализированного источника стал двухтактный инвертор, выполненный на IGBT-модулях.

Выходной выпрямитель - двухполупериодный. Ток изменяется широтно-импульсным регулированием. На охладителях транзисторов установлен датчик температуры для защиты источника от перегрева.

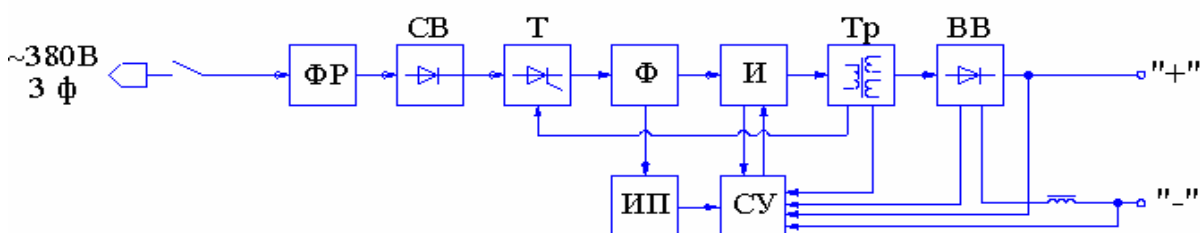


Рис. 2. Функциональная схема источника

ФР - радиочастотный фильтр; СВ - сетевой выпрямитель; Т - управляемый силовой ключ; Ф - сглаживающий фильтр; И - инвертор; Тр - трансформатор; ВВ - высокочастотный выпрямитель; СУ - система управления; ИП - источник подпитки системы управления

Напряжение питания предварительно фильтруется радиочастотным фильтром ΦP , выпрямляется сетевым выпрямителем CB , поступает через управляемый силовой ключ T на фильтр Φ , где сглаживается и передается на инвертор I . Инвертор I совместно с высокочастотным трансформатором Tr преобразует постоянное напряжение в переменное, но уже высокой частоты. Затем высокочастотное напряжение вновь выпрямляется отдельным выпрямителем BB и поступает на клеммы источника через сглаживающий дроссель. Выходные параметры источника обеспечивает система управления CU инвертором. Выделенный источник питания $ИП$ служит для ее подпитки.

Интеллектуальная система управления на базе контроллера обеспечивает не только динамическое изменение энергетических характеристик источника, что необходимо для реализации быстропротекающих процессов сварки, но и значительно упрощает панель управления его функциями, что особенно важно при контроле и корректировке разнотемповых процессов.

Практическая реализация УСП стала возможной благодаря специально разработанной системе управления источником, обеспечивающей динамичное изменение его энергетических характеристик в микроциклах переноса капли через дуговой промежуток. Для этого использована интеллектуальная система датчиков обратных связей, позволяющая оперативно изменять энергетические параметры процесса по информации о касании капли поверхности ванны, площади ее первичного контакта, а также изменении радиуса шейки в зоне «капля-проволока». Это позволяет успешно производить сварку тонкого металла в различных пространственных положениях или сварку более толстостенных металлоконструкций по открытому зазору с формированием качественного обратного валика.

Наши исследования в области орбитальной сварки и данные других авторов, например [8], показали, что процесс сварки плавящимся электродом наиболее критичен при формировании корня шва, и поэтому требует особого внимания к его устойчивости. В тоже время при заполнении разделки и

выполнении облицовочных проходов во многих случаях возможно применение традиционных процессов импульсно-дуговой сварки или сварки короткой дугой. Поэтому в источнике наряду со сваркой с УКП при КЗ предусмотрена возможность реализации и более простых в управлении процессов сварки, в том числе и механизированных:

- импульсно-дуговой сварки (ИДС) длинной дугой [9];
- сварки короткой дугой с систематическими КЗ [3,10];

На рис. 3 приведены осциллограммы изменения энергетических параметров в микроцикле каплепереноса этих методов сварки, реализуемых многофункциональным источником, получившим индекс ДС-400.33-УКП.

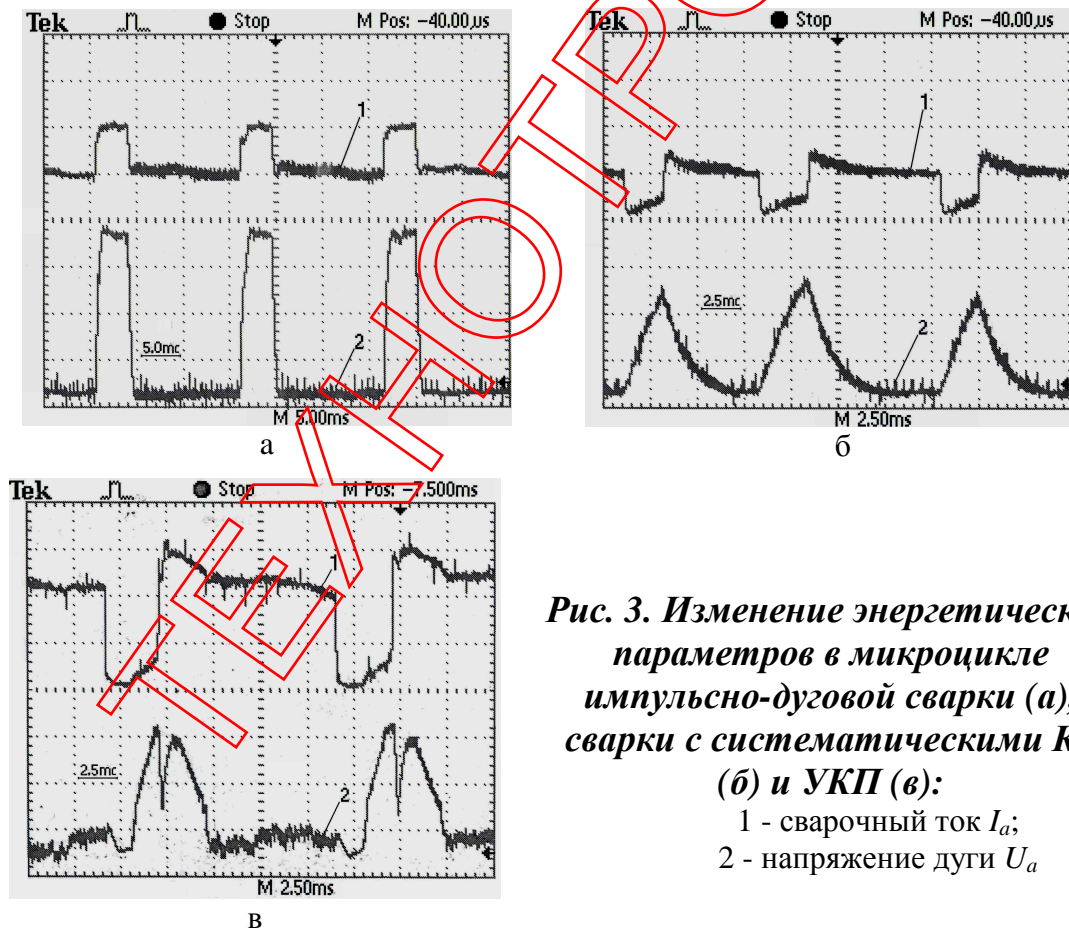


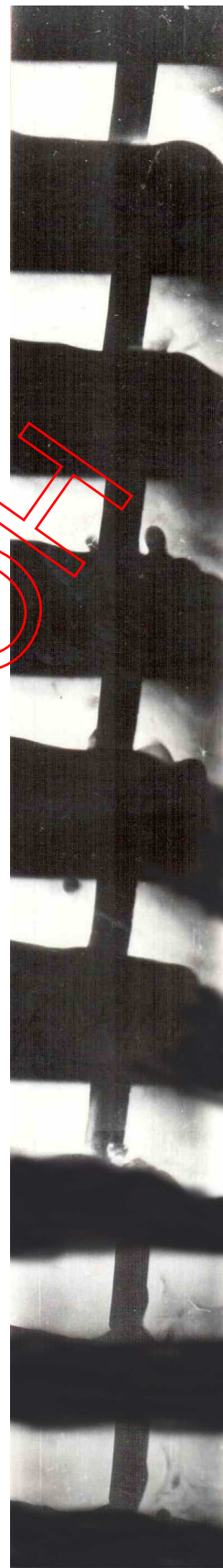
Рис. 3. Изменение энергетических параметров в микроцикле импульсно-дуговой сварки (а), сварки с систематическими КЗ (б) и УКП (в):

- 1 - сварочный ток I_a ;
2 - напряжение дуги U_a

Известно [11], что сварка с КЗ на неоптимальных режимах приводит к повышенному разбрызгиванию. Наши исследования (рис. 4) зафиксировали, что при сварке с КЗ брызгами могут быть как капли электродного металла, так и выплески металла из сварочной ванны



а



б

Рис. 4. Фрагменты кинограмм образования брызг (а) электродного металла и брызг (б) от выплесков металла с поверхности сварочной ванны (3600 кадров/с)

Установлено, что главными причинами подобных явлений могут быть как неудовлетворительный контакт при первичном касании капли поверхности ванны (см. рис. 4а), так и избыточный контакт (см. рис. 4б), особенно при максимальном токе сварки. Оба явления связаны с газодинамическим давлением дуги, а также электромагнитными явлениями в дуге и на поверхности сварочной ванны, приводящими к автоколебаниям ее поверхности.

Учитывая изложенное, расширение области устойчивых режимов сварки с минимальным разбрызгиванием возможно только когда источник обладает малой индуктивностью и регулируемым углом наклона ВАХ, что обеспечивает меньшую чувствительность процесса к изменениям скорости подачи электродной проволоки на стадии образования капли и сопротивления сварочной цепи при слиянии капли с ванной.

Поэтому для демпфирования колебаний капли и поверхности сварочной ванны от динамического воздействия дуги при сварке с УКП источник ДС-400.33-УКП обеспечивает плавный спад заднего и нарастание переднего фронтов импульса тока, как это показано на рис. 4в. Для обеспечения этого, размыкание шунтирующего ключа происходит только при выполнении условий: $dR/dt > 0$ и $U_a < 10$ В.

Естественно, что при сварке длинной дугой датчики обратных связей не фиксируют КЗ, и поэтому процесс УКП переходит в импульсно-дуговую сварку со скачкообразным нарастанием и спадом тока в импульсе. При этом в зависимости от значений и скважности импульсов тока возможна реализация двух вариантов ИСД: с образованием капли на базовом токе и переносом ее в ванну током импульса, либо с поддержанием дуги базовым током, образованием и переносом капли током импульса.

Реализация технологических требований к продукции. Технические характеристики разработанного источника для сварки плавящимся электродом с УКП приведены в таблице, а его общий вид со стороны лицевой панели на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид многофункционального сварочного источника ДС-400.33-УКП

Технические характеристики инверторного источника ДС-400.33-УКП

Таблица

Параметр	Значение
Номинальное напряжение питающей сети, В допустимые отклонения, %	380 +15 / -10
Частота тока питающей сети допустимые отклонения, %	50 ± 10
Максимальная потребляемая мощность, кВА	не более 22
Точность поддержания сварочного тока при изменении напряжения сети от 198 до 242 В на фазу, %	+2 / -5
Точность поддержания сварочного тока при изменении частоты питающего напряжения от 45 до 65 Гц, %	± 5
Реализуемые процессы сварки	УКП / с КЗ
<i>Сварка с управляемым каплепереносом (УКП) и импульсно-дуговая сварка (ИДС)</i>	
Минимальный базовый ток, А (при напряжении не более 20 В)	50
Максимальный базовый ток, А (при напряжении не более 26 В)	150
Максимальный ток импульса, А (при напряжении не более 36 В)	500
Минимальный ток импульса, А (при напряжении не более 28 В)	150
Напряжение холостого хода источника при импульсе тока и номинальном напряжении сети, В	113
Масса источника, кг, не более	48
<i>Сварка с естественными короткими замыканиями (КЗ)</i>	
Номинальный сварочный ток, А	400
Максимальный ток, при ПН 60%, А (напряжение до 36 В)	400
Ток короткого замыкания, А (при максимальном напряжении и номинальном напряжении сети)	450
Минимальный сварочный ток, А (при напряжении не менее 16 В)	50

Разработанный многофункциональный сварочный источник ДС-400.33-УКП обеспечивает работу установки УАСТ-1 [13], предназначенной для автоматической орбитальной сварки трубопроводов. В этой установке координацию работы источника ДС-400.33-УКП и оригинальной сварочной головки АСТ-1 осуществляет малогабаритная аппаратура управления с пультом ДУ. Аппаратура обеспечивает работу функциональных механизмов сварочной головки при реализации процесса орбитальной сварки с УКП.

Однако источник ДС-400.33-УКП может работать с блоками подачи проволоки для механизированной сварки, например, с ПМ-4.33.

Удовлетворение требований потребителей к техническим возможностям и качеству продукции. Сбор информации о надежности инверторных источников показал, что значительная доля отказов в их работе связана с трудно прогнозируемыми скачками напряжения входной сети, зачастую выходящими за пределы допусков, и конденсатом влаги на поверхности печатных плат из-за разницы температур их поверхности и окружающего воздуха. Последняя проблема особенно характерна для строительства трубопроводов в Сибири, так как основной объем работ приходится выполнять в зимний период из-за состояния грунтов в другие времена года и связанных с этим транспортных и других проблем.

Поэтому для повышения надежности выпускаемого сварочного оборудования, в НИИ «ТехноТрон» была организована поддержка его качества на всех стадиях жизненного цикла, в том числе при проектировании, изготовлении, а также сопровождении и техническом обслуживании при эксплуатации [10,12]. Для использования в тяжелых условиях строительных и монтажных работ корпус источника выполняется в усиленном варианте, а печатные платы проходят дополнительную изоляцию и термотестирование.

Для внедрения предлагаемых технологий и оборудования проведена исследовательская и производственная аттестация предлагаемых процессов сварки. Одновременно осуществлена подготовка сварщиков-операторов для

работы на установке УАСТ-1, проведено обучение групп обслуживающего персонала рациональным приемам по устранению отказов электрических и механических частей оборудования, его техническому обслуживанию.

Следует отметить, что схожие подходы использует и ряд других отечественных и зарубежных предприятий, однако решаемые ими задачи более просты в реализации, так как связаны в первую очередь с механизированной (полуавтоматической) сваркой. В тоже время разработкой и реализацией таких сложных и высокотехнологических процессов сварки, как орбитальная сварка трубопроводов плавящимся электродом, в мире занимается настолько малое число предприятий и фирм, что их можно перечислить по пальцам одной руки, особенно если их продукция предназначена для использования на потенциально опасных объектах [10,14].

В настоящее время головная партия установок УАСТ-1 поставлена для использования при ремонтных и профилактических работах на объектах ОАО «Газпром» и в структурных подразделениях ОАО «Стройтрансгаз».

Таким образом, можно констатировать, что разработка отечественных быстродействующих источников сварочного тока и аппаратур управления с применением микропроцессорной техники позволила обеспечить требуемый, а не получаемый из физики процесса, тепломассоперенос капель электродного металла, и следовательно на практике реализовывать высокотехнологичные процессы орбитальной сварки.

Выводы

Выполненные работы по созданию многофункционального сварочного источника с динамическим изменением энергетических характеристик за счет использования оригинальных схмотехнических решений и датчиков обратных связей, современной силовой электроники и микропроцессорной техники в системе управления позволяют на практике обеспечить управляемый тепломассоперенос капель электродного металла.

Созданный источник ДС-400.33-УКП не только по своим техническим и технологическим характеристикам не уступает лучшим зарубежным

образцам специализированных сварочных источников, но и является значимой основой при создании других типов высокотехнологичного оборудования для сварки плавящимся электродом, полностью соответствующих современным тенденциям развития инновационных технологий и оборудования в области сварки.

Список литературы

1. *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.
2. *Development of digital gas metal arc welding system* / M.D. Ngo, V.H. Duy, N.T. Phuong, et al. // Journal of Materials Processing Technology. - 2007, Vol.189. - №6. - P. 384-391.
3. *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. - С. 18-20.
4. *Имитационное моделирование особенностей управления переносом капель при сварке с короткими замыканиями* / О.Б. Гецкин, С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, О.П. Витько // Технология машиностроения. - 2008. - №10. - С. 25-29.
5. *A Mathematical model of wire feeding mechanisms in gas metal arc welding* / T.M. Padilla, T.P. Quinn, D.R. Munoz, R.A.L. Rorrer // Welding Journal. - 2003, Vol.82. - №5. - P. 100s-109s.
6. *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.
7. *Некоторые тенденции в развитии приборов и устройств силовой электроники* / Г.В. Грабовецкий, С.А. Харитонов, Е.Б. Преображенский и др. // Химия в интересах устойчивого развития. - 2001, Т.9. - №7. - С. 921-928.
8. *Era T., Ueyama T. Spatter reduction of GMAW by current waveform control* // Welding International. - 2007, Vol. 21. - №7. - P. 496-501.
9. *Жерносеков А.М., Андреев В.В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (обзор)* // Автоматическая сварка. - 2007. - №10. - С. 48-52.
10. *Полосков С.И. Технологические основы автоматической орбитальной сварки трубопроводов атомных станций. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.* - М.: НИКИМТ, 2006. - 32 с.
11. *Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки. Т.3: Давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла.* -

Челябинск: ЮУрГУ, 2003. - 485 с.

12. Система оперативного контроля качества сварочного оборудования в процессе его промышленного производства / Б.Е. Патон, А.Е. Коротынский, М.И. Скопюк и др. // Автоматическая сварка. - 2002. - №5. - С. 29-31.

13. Гецкин О.Б., Гецкин Б.Л., Полосков С.И. Практическая реализация управляемого тепломассопереноса капель при автоматической орбитальной сварке плавящимся электродом // Состояние и перспективы развития электротехнологий: Труды XIII Бенардосовских чтений, 18-20 октября 2006 г. - Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2006. - С. 140-145.

14. Yapp D, Blackman S. Recent developments in high productivity pipeline welding // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. - 2004, Vol.26. - №1. - P. 89-97.

Аннотация

Создание многофункционального инверторного источника для сварки с управляемым каплепереносом электродного металла

О.Б. Гецкин, Б.Л. Гецкин, С.И. Полосков

Рассматривается комплекс вопросов по созданию многофункционального сварочного источника, обеспечивающего управляемый каплеперенос электродного металла при сварке плавящимся электродом.

Созданный источник ДС-400.33-УКП не только по своим техническим и технологическим характеристикам не уступает лучшим зарубежным образцам специализированных инверторных источников, но и является значимой основой для создания других видов высокотехнологичного сварочного оборудования.

Abstract

Creation of multipurpose power source for welding with controlled drop transfer of electrode metal

O.B. Getskin, B.L. Getskin, S.I. Poloskov

Questions of creation of multipurpose welding source providing operated drop transfer of welding electrode metal are considered.

Created power source ДС-400.33-УКП is not only comparable by it's technical characteristics to the best foreign samples, but also provides a significant basis for creating other types of the hi-tech welding equipment.