

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕНОСА МЕТАЛЛА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ (Обзор)

А. М. ЖЕРНОСЕКОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы тенденции развития современных источников питания дуги и технологий сварки плавящимся электродом в защитных газах. Рассмотрены различные типы переноса металла электрода и возможность управления ими путем варьирования параметров сварочного тока. Обоснована перспективность управляемого импульсно-дугового процесса сварки в защитных газах.

Ключевые слова: управление переносом металла, дуговая сварка плавящимся электродом, защитные газы, короткие замыкания, вращающаяся дуга

Среди дуговых процессов сварка плавящимся электродом в защитных газах занимает ведущее место в промышленности Западной Европы, США, Японии [1,2]. Однако новые функциональные возможности сварочного оборудования, в том числе источников питания дуги, которые открываются благодаря развитию силовой электроники, не всегда способствуют появлению качественно новых технологических процессов сварки. Разработчики зачастую рекламируют сварочное оборудование, реализующее различные алгоритмы управления, но обеспечивающее лишь один тип переноса металла электрода, как совершенно новые технологии.

В данной работе автором проанализированы тенденции развития управления переносом металла в защитных газах и технологий сварки плавящимся электродом, а также показана роль импульсно-дугового процесса с управляемым переносом металла электрода.

Многие характеристики процесса сварки в защитных газах зависят от типа переноса металла электрода, который оказывает существенное влияние на различные технологические характеристики сварочной дуги, например, тепловой баланс, ее пространственную устойчивость, интенсивность протекания металлургических реакций в зоне сварки, потери на угар и разбрызгивание, а также глубину проплавления, параметры и форму сварных швов [3].

Существует несколько типов переноса металла электрода в защитных газах [4], основными из которых являются мелко- или крупнокапельный с короткими замыканиями (КЗ) дугового промежутка; мелко- или крупнокапельный без КЗ дугового промежутка и струйный процесс, различают также вращательно-струйный. Перенос парами металла присутствует в меньшей или большей ме-

ре при всех способах сварки плавящимся электродом в защитных газах. Однако зачастую имеются смешанные типы переноса металла, обусловленные изменением параметров сварочных процессов. Отдельно следует выделить управление переносом металла по принципу «один импульс – одна капля».

Тип переноса металла, а также силы, действующие на металл электрода в дуге, достаточно полно описаны в работах [4, 5]. Каждый тип переноса металла характеризуется как преимуществами, так и недостатками. Поэтому от типа переноса зависят многие технологические характеристики процесса сварки плавящимся электродом в защитных газах, например диапазон свариваемых толщин.

Для каждого типа переноса металла электрода имеется свой диапазон значений сварочных токов и напряжений на дуге (рис. 1). Для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом (ИДСПЭ) наиболее эффективный диапазон средних токов сварки составляет 60...300 А, напряжения на дуге — 16...32 В.

Тип переноса металла зависит от многих параметров процесса сварки. Основными с точки зрения управления процессом являются следующие: состав электродной проволоки и защитной среды; значение, полярность, плотность и форма

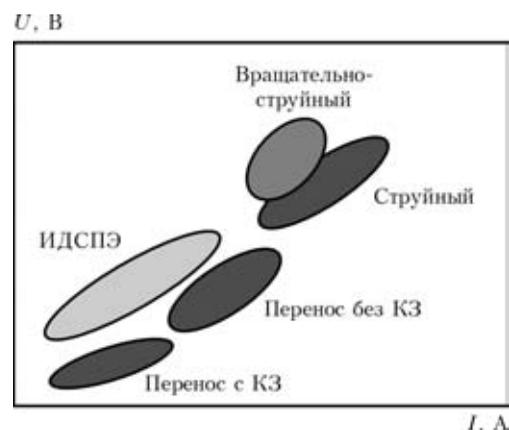


Рис. 1. Диапазон сварочных токов и напряжений на дуге при различных типах переноса металла



сварочного тока; возможность применения различных механизмов подачи сварочной проволоки. Существуют различные возмущающие воздействия, которые необходимо учитывать при проектировании сварочного оборудования, так как они могут изменить тип переноса металла. Например, при ИДСПЭ уменьшение напряжения питающей сети или вылета электрода может привести к изменению переноса от мелкокапельного без КЗ до переноса с ними [6]. Состояние поверхности проволоки также может сказаться на изменении типа переноса металла электрода. Сварку в защитных газах, как правило, выполняют на постоянном токе. Наличие в процессе сварки магнитного дутья изменяет длину и форму дуги, что в свою очередь оказывает влияние на формирование и отделение капель. На рис. 2 представлена схема основных составляющих сварочного процесса, влияющих на перенос металла электрода.

Путем варьирования составов защитной газовой смеси и сварочных проволок улучшают качество металла швов, воздействуя прежде всего на силы поверхностного натяжения металла и степень сжатия сварочной дуги [7–9]. При этом мелкокапельный перенос металла достигается при меньших значениях сварочного тока.

Механизмы подачи сварочной проволоки также позволяют эффективно управлять процессом сброса капель, особенно при сварке с КЗ [10, 11]. Особая роль при получении необходимого типа переноса металла электрода принадлежит источникам питания сварочной дуги. Изменяя форму сварочного тока, можно эффективно влиять на процессы формирования капли, время ее нахождения в дуге и многое другое.

Оптимизация приведенных на рис. 2 параметров, воздействующих на перенос металла при сварке плавящимся электродом, зависит от конкретных технологических задач. Как правило, сначала оптимизируется какой-либо один параметр, а затем с учетом эффективности управления — следующий. Например, при ИДСПЭ сталей в смеси газов сначала оптимизировался состав газовой смеси.



Рис. 2. Схема основных параметров сварочного процесса, воздействующих на перенос металла электрода

Для современного трубопроводного транспорта требуются высокие значения рабочего давления перекачки энергоносителей и применение высокопрочных трубных сталей X80 и X100. Сварка плавящимся электродом таких сталей привела к необходимости создания новых защитных смесей, например $Ar + 12\% CO_2 + 5\% He$, позволяющих получать хорошее сплавление с боковыми стенками при многопроходной автоматической сварке [9]. Далее оптимизации подвергается форма импульсов сварочного тока, разрабатываются системы автоматической стабилизации параметров процесса.

Для управления процессом сварки плавящимся электродом с КЗ дугового промежутка используется много способов [12]. На рис. 3 представлены основные фирмы, выпускающие оборудование, на котором реализуются процессы сварки с КЗ.

Преимущества, связанные с использованием переноса металла с КЗ, производители сварочного оборудования описывают по-разному. Процесс STT (Surface Tension Transfer — перенос за счет сил поверхностного натяжения) фирмы «Lincoln Electric» использует для работы быстродействующий инверторный источник питания, который позволяет управлять формой сварочного тока [13, 14]. В источнике питания дуги применена улучшенная технология управления формой сварочного тока (Waveform Control Technology), обеспечивающая значительные преимущества по сравнению с традиционной сваркой MIG КЗ. Этот способ преимущественно предназначен для сварки корневых швов, а также снижения разбрызгивания, особенно в чистом CO_2 .

Процесс Cold Metal Transfer (CMT — перенос «холодного» металла) фирмы «Fronius» реализуется посредством реверсирования подачи проволоки [15, 16]. Среди преимуществ необходимо отметить незначительное разбрызгивание, в том числе и при использовании чистого CO_2 , возможности сварки по увеличенному зазору за счет снижения тепловложения и пайки, а также сварки металла с различными теплофизическими свойствами, например стали с алюминием [16].

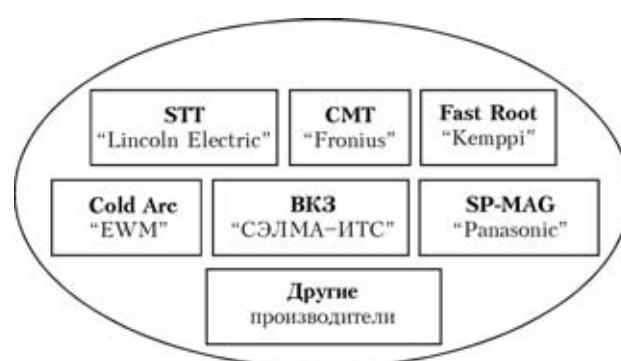


Рис. 3. Фирмы-производители оборудования для процесса сварки в защитных газах с КЗ

Фирма EWM реализует процесс Cold Arc, предназначенный для сварки с КЗ, который позволяет соединять стальные листы толщиной от 0,3 до 1,5...2,0 мм, а также оцинкованные листы, хорошо управлять сваркой корневых швов в труднодоступных местах, выполнять сварку магниевых сплавов, сварку соединений сталь-алюминий, сталь-магний, алюминий-магний.

Технология Fast Root фирмы «Kempr» осуществляет процесс с КЗ посредством цифрового управления сварочным током и напряжением дуги. Fast Root в основном разработана для сварки корневых швов, но может использоваться и для сварки тонкого металла [10].

НПО «СЭЛМА-ИТС» разработан процесс сварки с вынужденными КЗ (ВКЗ) дугового промежутка [10, 13], позволяющий уменьшать разбрызгивание в чистом CO₂.

Японские специалисты также работают над процессом сварки дугой с КЗ. Представляют интерес работы по управлению формой импульса сварочного тока SP-MAG (superimposition — наложение) токов [17]. К преимуществам способа относят незначительное разбрызгивание металла, стабильность горения дуги, а также возможность управления тепловложением. Разработанная система управления MTS (Metal Transfer Stabilization) предотвращает образование больших капель и уменьшает разбрызгивание.

Таким образом, производители под различными торговыми марками выпускают электросварочное оборудование, реализующее процесс сварки с КЗ с упомянутыми преимуществами. Оно находит применение в различных отраслях промышленности — автомобильной, транспортном машиностроении, пищевой и химической промышленности, обработке тонколистового металла.

Совершенствуются технологии, осуществляющие процессы сварки со струйным и вращательно-струйным переносом металла электрода. Немецкая фирма EWM выпустила на рынок оборудование Integral-inverter MIG 500 HIGH-SPEED, реализующее высокоскоростную сварку вращающейся дугой [18].

Как правило, процессы сварки с повышенной длиной вылета электрода и переходом к вращательно-струйной дуге технологически использовали мало. Немецкие исследователи применяли сплошные проволоки диаметром 1,2 мм, защитный газ Ar + 4 % O₂, длина вылета составляла 25...35 мм, скорость сварки достигала 30 м/ч. На основании полученных результатов исследования процесса сварки вращающейся дугой можно сле-



Рис. 4. Схема развития процесса ИДСПЭ

дать вывод о возможной альтернативе сварке под флюсом [18].

Особое место среди различных типов переноса электродного металла занимает управляемый импульсно-дуговой перенос [19], который применяют не только для сварки различных материалов, но и для реализации переходных типов переноса металла, а также осуществления новых комбинированных гибридных технологий сварки. На рис. 4 представлена схема развития областей применения процесса ИДСПЭ.

Интенсивно развивается направление, связанное с регулированием формы импульса сварочного тока для процесса ИДСПЭ. В ИЭС им. Е. О. Патона это направление появилось еще в 1980-х годах [20, 21]. Очень важны также теплофизические свойства свариваемых материалов, что отражается, например, на построении систем автоматической стабилизации процесса ИДСПЭ [22].

Представляют научный интерес работы японских специалистов в области регулирования формы сварочного тока для ИДСПЭ [23]. В случае алюминий-магниевых сплавов при прямоугольной форме импульсов сварочного тока отрыв капли приводит к образованию мелких брызг, поэтому предлагается форма импульса, позволяющая устранить налипание брызг на изделие и улучшить внешний вид сварных швов (рис. 5, а).

Для углеродистой стали используют защитный газ с 20...25 % CO₂. Но в заводских условиях на крупных машиностроительных предприятиях, где проведена централизованная подача газовой смеси, колебания состава смеси могут достигать нескольких процентов. Это дестабилизирует капельный перенос металла, действующий по принципу «один импульс — одна капля». Поэтому японские

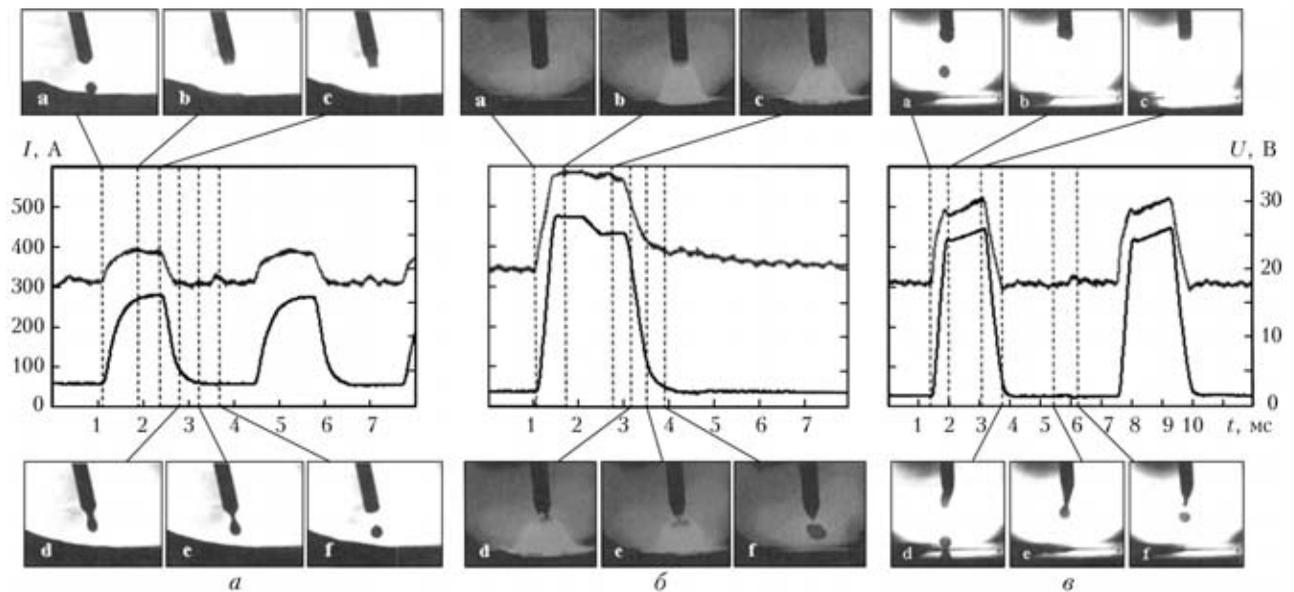


Рис. 5. Формы сварочного тока и характер переноса металла электрода при ИДСПЭ алюминиево-магниевых сплавов (а), углеродистых (б) и нержавеющей сталей (в) [23]

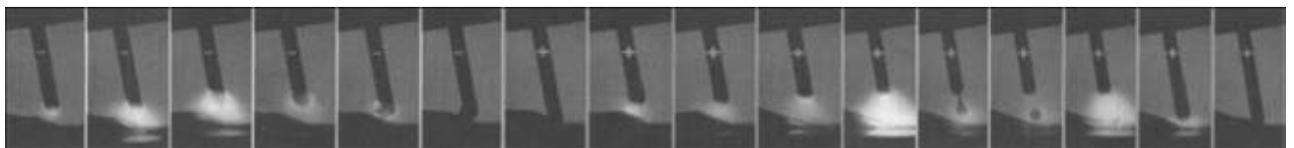


Рис. 6. CMT Pulse-Advanced процесс [26]

специалисты формируют двухступенчатые импульсы (рис. 5, б). Таким образом достигается капельный перенос металла даже при содержании в смеси до 30 % CO_2 , а также подавляется образование очень мелких брызг, появляющихся после отрыва основной капли. Помимо уменьшения брызгообразования, происходит и экономия защитного газа (аргона).

При ИДСПЭ нержавеющей стали, которая имеет большее поверхностное натяжение, применяется смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2$ с большим содержанием аргона и добавлением O_2 . Но часто происходит нарушение синхронного переноса металла через дугу. Поэтому разработана форма импульса, которая по мере образования капли замедляет процесс ее отделения (рис. 5, в).

Представляет интерес способ с наложением импульсов низкой частоты для измельчения зерна и снижения чувствительности к кристаллизационным трещинам. В ИЭС им. Е. О. Патона также занимались подобным модулированием сварочного тока. Так, при ИДСПЭ стыковых соединений из сплава АМг6 благодаря низкочастотной модуляции в паузе стало возможным исключить прожоги и нарушение формирования швов из-за неточностей сборки [24].

Импульсно-дуговая сварка получила развитие в новых технологиях. Появились источники питания импульсной дуги, реализующие модернизированный способ сварки «Speed Pulse» [25]. Предлагаемый подход позволяет сбрасывать за один импульс несколько капель электродного металла и задействовать часть струйного процесса в области малых токов. Таким образом, импульс-

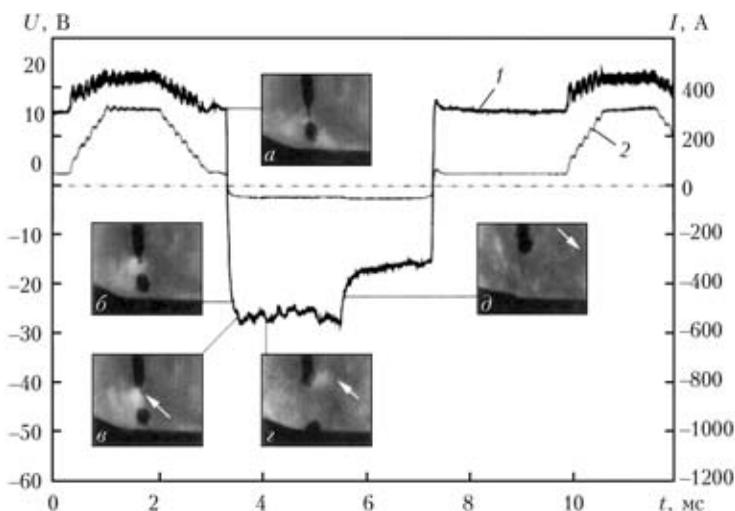


Рис. 7. Способ AC Pulsed MIG [27]: а-д — кинограммы переноса металла электрода; 1, 2 — текущие значения соответственно напряжения на дуге и сварочного тока (проволока А5356 диаметром 1,2 мм; действующие значения сварочного тока 100 А, действующее значение напряжения на дуге 16,8 В, обратная полярность 20 %)

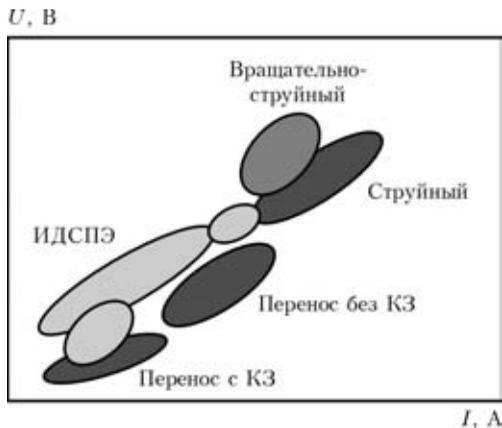


Рис. 8. Области реализации процесса ИДСПЭ

сная дуга становится более эффективной — увеличивается глубина проплавления и повышается скорость сварки. Новый процесс хорошо зарекомендовал себя при сварке углеродистых сталей [25].

Фирма «Fronius» предложила процессы сварки СМТ Advanced и СМТ-Pulse-Advanced [26]. По сравнению с уже известной технологией «холодного» переноса металла, СМТ Advanced обеспечивает низкое тепловложение. Новая технология дает возможность заполнять более широкие зазоры в результате варьирования циклов тепловложения. На рис. 6 представлена кинограмма процесса СМТ Pulse-Advanced. Отделение капли происходит в моменты КЗ и действия импульсов обратной полярности (как при «классической» импульсно-дуговой сварке). Таким образом, совмещаются два типа переноса металла электрода — с КЗ и мелкокапельный импульсно-дуговой без КЗ.

«Классическую» ИДСПЭ выполняют на постоянном однополярном токе. Поэтому вопросы магнитного дутья остаются актуальными. Развивается направление, связанное с ИДСПЭ, при котором базовый ток дуги изменяет полярность (рис. 7) [27, 28]. Таким образом, уменьшается тепловложение. Преимуществами импульсного процесса на переменном токе (АС Pulsed MIG) являются низкая температура сварочной ванны (сварка изделий с тонкой стенкой), лучшее отделение капли, предотвращение магнитного дутья.

ИДСПЭ получила развитие в технологических процессах Time Twine, Pulse MIG/MAG-Laser и Time Twin-Pulse MIG/MAG-Laser, где применяются две импульсные дуги, импульсная дуга и лазер, три импульсные дуги и лазер [29–32].

Таким образом, процесс ИДСПЭ имеет преимущества как при соединении различного класса материалов, так и при различных типах переноса электродного металла. На рис. 8 представлены области реализации процесса ИДСПЭ с различными типами переноса электродного металла.

Выводы

1. Электросварочное оборудование для дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах реализует основные типы переноса металла электрода, получают развитие переходные типы переноса металла электрода.

2. Показано, что управляемый импульсно-дуговой процесс эффективно применяется при сварке большого спектра металлов, а также во многих комбинированных технологиях.

3. Установлено, что разработка современного электросварочного оборудования, реализующего различные типы переноса металла электрода, должна происходить с учетом управляемого импульсно-дугового процесса сварки.

1. Миддельдорф К., фон Хофе Д. Тенденции развития технологий соединения материалов // Автомат. сварка. — 2008. — № 11. — С. 39–47.
2. Сато К. Современные источники питания для дуговой сварки с низким разбрызгиванием // Технология сварки. — 2008. — № 2. — С. 60–65. — Яп.
3. Сварка в машиностроении: Справ. в 4 т. / Под ред. Н. А. Ольшанского. — М.: Машиностроение, 1978. — Т.1 — 504 с.
4. Потатьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
5. Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
6. Шейко П. П., Жерносеков А. М., Шимановский Ю. О. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с автоматической стабилизацией параметров режимов // Автомат. сварка. — 2004. — № 1. — С. 8–11.
7. Criteri di scelta del gas di protezione per la saldatura a filo continuo con fili pieni // Riv. italiana della soldatura. — 2010. — № 5. — P. 629–637.
8. Kusch M. Metall-Inertgasschweißen von Aluminium mit gepulster Schutzgaszufuhr // Schweißen und Schneiden. — 2006. — 58, № 1. — S. 19–22.
9. Автоматизированная сварка трубопроводов: Сварка за рубежом // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 52–56.
10. Лебедев В. А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла (Обзор) // Там же. — 2010. — № 10. — С. 45–53.
11. Воронин Н. М. Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки // Там же. — 1996. — № 10. — С. 3–9.
12. Ланкин Ю. Н. Автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом в CO_2 с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка (Обзор) // Там же. — 2007. — № 1. — С. 3–10.
13. Особенности современных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах / М. В. Карасев, Е. М. Вышемирский, В. И. Беспалов и др. // Там же. — 2004. — № 12. — С. 38–41.
14. Влияние параметров импульсной сварки методом STT на тепловыделение и структуру соединения / О. В. Зябкин, В. Н. Кусков, Д. А. Потапов, А. П. Крылов // Загот. пр-ва в машиностр. — 2009. — № 4. — С. 13–15.
15. Бондаренко В. Л. Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус» // Автомат. сварка. — 2004. — № 12. — С. 55–58.
16. Химмельбауер К. Процесс СМТ — революция в сварочных технологиях // Сварщик в России. — 2010. — № 3. — С. 28–32. — Яп.



17. Хирота Ю. Новые технологии дуговой сварки // Журн. Яп. свароч. о-ва. Спец. вып. Новейшие способы дуговой сварки. — 2010. — 79, № 6. — С. 15–39.
18. Технологии и руководства EWM highspeed // www.ewm.ru/technologies/highspeed
19. Жерносеков А. М., Андреев В. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (Обзор) // Автомат. сварка. — 2007. — № 10. — С. 48–52.
20. А. с. 4696750/27 СССР, МКП В 23 К 9/09. Источник тока для импульсно-дуговой сварки / В. М. Павшук, П. П. Шейко. — Оpubл. 07.10.91, Бюл. № 37.
21. Павшук В. М. Способ и источник питания импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом со ступенчатой формой импульса: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1993. — 16 с.
22. Жерносеков А. М. Системы автоматической стабилизации процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 2006. — 19 с.
23. Камияма Т. Разработка машин для дуговой сварки // Технология сварки. — 2010. — 58, № 2 — С. 46–57. — Яп.
24. Шейко П. П. Однопроходная импульсно-дуговая сварка модулированным током изделий из сплава АМг6 // Автомат. сварка. — 1996. — № 7. — С. 31–32.
25. Jaeschke B., Vollrath K. Speedpulse—eine produktivitaets- und effizienzsteigernde Weiterentwicklung des MSG-Impulsschweißens // Schweißen und Schneiden. — 2009. — 61, № 9. — S. 548–553.
26. CMT ADVANCE: специалист по сварке тонкого металла // Автомат. сварка. — 2010. — № 10. — С. 67–68.
27. Tong Hongjun, Ueyama Tomoyuki. Solutions to problems of tiny spatter and arc interruption in AC Pulsed MIG arc welding // Quarterly J. of the Japan Welding Society. — 2004. — 22, № 2. — P. 240–247.
28. Maxl G., Posch G. MAG — Wechselstromschweißen von hochfesten Feinkornbaustaehlen // Schweiss & Prueftechnik. — 2008. — № 3. — S. 35–38.
29. МИГ/МАГ сварка тандемом / С. Геке, Й. Хедергард, М. Лундин, Г. Кауфманн // Свароч. пр-во. — 2002. — № 4. — С. 30–35.
30. Штауфер Х., Хакль Х. Лазерно-дуговая сварка в автомобильной промышленности // Автомат. сварка. — 2001. — № 12. — С. 29–32.
31. Stauffer H., Ruehrnoebl M. Fuer große Blechdicken und hohe Schweißgeschwindigkeiten: Laserhybrid- + Tandemschweißen // Praktiker. — 2006. — № 10. — S. 300–302.
32. Ках П., Салминен А., Мартикаинен Дж. Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) // Автомат. сварка. — 2010. — № 6. — С. 38–47.

The trends in development of modern power sources of the arc and gas-shielded consumable-electrode welding technologies are analysed. Different types of electrode metal transfer and the possibility of controlling it by varying parameters of the welding current are considered. A high potential of the controlled gas-shielded pulsed-arc welding process is substantiated.

Поступила в редакцию 12.10.2011

НОВАЯ КНИГА

Welding Fundamentals and Processes. — ASM Handbook (The Materials Information Society), 2011. — Vol. 6A. — 920 p. (Основы сварочных процессов: Справочник, том 6А).

Под редакцией:

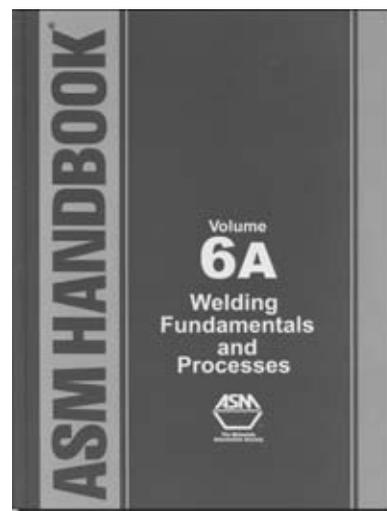
Thomas J. Lienert (Los Alamos National Laboratory),

S. Suresh Babu (The Ohio State University),

Thomas A. Siewert (National Institute of Standards and Technology),

Viola L. Acott (The University of Alabama Tuscaloosa).

Книга представляет собой сборник тематических публикаций, охватывающих большинство проблем современного сварочного производства. Она полезна широкому кругу ученых, инженеров и специалистов в качестве настольной книги при решении текущих и перспективных задач.



Со справочником можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е. О. Патона.

По поводу получения копий статей просьба обращаться в технический отдел ASM International: www.asminternational.org.