



ИМПУЛЬСНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ (Обзор)

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

Представлен анализ области применения импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом различных материалов, а также рассмотрены особенности, тенденции и перспективы развития этого процесса сварки. Показано, что указанный способ сварки характеризуется определенными технологическими преимуществами перед другими способами сварки плавящимся электродом в защитных газах и активно применяется в современных высокопроизводительных технологиях.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, плавящийся электрод, защитные газы, алюминиевые сплавы, углеродистые стали, легированные стали, комбинированные технологии

В последние годы за рубежом в различных отраслях промышленности значительно возрос объем применения сварки плавящимся электродом в защитных газах. Дальнейшее развитие получил также способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом (ИДСПЭ). Первоначально ИДСПЭ в основном применяли для соединения алюминиевых сплавов, в том числе при изготовлении изделий ответственного назначения. В связи с этим у отечественных специалистов-сварщиков сложилось мнение об ограниченном использовании ИДСПЭ для соединения других материалов. Следует отметить, что этот способ сварки качественно отличается от других процессов дуговой сварки плавящимся электродом, например, модулированным током или в углекислом газе с короткими замыканиями дугового промежутка, и применяется прежде всего для управления процессами плавления и переноса металла электрода в различных пространственных положениях в инертных защитных газах или смесях на их основе. При ИДСПЭ рекомендуется использовать сварочный ток средних значений $I_{св} = 50...350$ А, при котором возможен мелкокапельный управляемый перенос металла на сварочном токе докритических значений. Необходимый диапазон частоты импульсов тока, как правило, составляет 30...300 Гц. Существуют две концепции построения источников питания дуги для ИДСПЭ. Одна из них основана на плавлении металла электрода во время прохождения базового тока и переноса образовавшейся капли в момент подачи импульса. Согласно другой базовый ток только поддерживает горение дуги, а импульсный — плавит и переносит электродный металл.

Особенностям технологии ИДСПЭ, а также сварочного оборудования, с помощью которого реализуется этот процесс, посвящено много публикаций, в том числе сотрудников Института электросварки им. Е. О. Патона [1–3]. Цель настоящей работы — провести краткий анализ областей и особенностей применения ИДСПЭ различных материалов, а также тенденций и перспектив дальнейшего развития этого способа сварки.

При ИДСПЭ алюминиевых сплавов разрушение оксидной пленки происходит более полно по сравнению с аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, а также отсутствуют вольфрамовые включения. Такие преимущества ИДСПЭ, как возможность сварки во всех пространственных положениях при выполнении монтажных швов (управляемый капельный перенос металла электрода), уменьшение тепловложения в металл сварного шва за счет низкого значения среднего тока сварки, а также увеличение скорости сварки, позволили активно внедрять указанный способ для изготовления алюминиевых конструкций различного назначения.

В работе [2] отмечается, что применение ИДСПЭ при изготовлении судовых надстроек из сплава АМг6 толщиной 4...25 мм по сравнению со сваркой неплавящимся электродом позволяет заметно повысить производительность процесса за счет увеличения скорости сварки. При этом имеет место также измельчение микроструктуры металла швов и повышение ее однородности по сравнению со сваркой без импульсов тока. Авторы указывают на возможность получения швов с малыми катетами и увеличения скорости сварки, что приводит к уменьшению деформаций конструкций.

Обеспечиваются высокие показатели качества сварных соединений, полученных ИДСПЭ в инертных газах, кузовов автомобилей из алюминиевых сплавов AlZn5Mg1, АМг3 [4] и полуавтоматической ИДСПЭ автомобильных полуприцепов-минераловозов грузоподъемностью 14 т с кузовом зак-

рытого типа длиной 6,5 м, каркас которого обшит листами из сплава АМг3 [5].

Эффективно также применение ИДСПЭ алюминиевых сплавов например, сплава АМг6 большой толщины (16, 20, 26, 30 и 50 мм) с узкой разделкой кромок в конструкциях ответственного назначения [6]. ИДСПЭ позволяет избежать явления блуждания катодного пятна по стенкам щелевой разделки (из-за проявления пинч-эффекта импульсная дуга пространственно устойчива) по сравнению со сваркой на постоянном токе. Обеспечивается также равномерное сплавление валиков с боковыми стенками и предыдущим слоем. Авторы работы [6] определили, что при ИДСПЭ вследствие уменьшения погонной энергии, а также сокращения времени контакта жидкой и твердой фаз в зоне сплавления за счет большей скорости сварки образуется значительно меньшее содержание хрупких составляющих, что повышает работоспособность сварных соединений. При ИДСПЭ сплава АМг6 удельная энергия разрушения сварных образцов с острым надрезом по зоне сплавления в 1,5...2,0 раза выше по сравнению с образцами, полученными сваркой трехфазной дугой [6].

Накоплен и используется положительный опыт освоения и внедрения промышленной технологии ИДСПЭ алюминиевых сплавов АМг6 и 1201 на базе разработок Института электросварки им. Е. О. Патона на российских предприятиях ОАО «НПО Композит», ПО «Стрела», ГК НПЦ им. М. В. Хруничева. Благодаря использованию ИДСПЭ существенно уменьшилось количество дефектов на кольцевых и продольных швах, выполненных на конструкциях ответственного назначения.

Применение ИДСПЭ для получения замковых соединений ответственного назначения сплава АМг6 обеспечивает формирование стыка без канавки, что значительно упрощает механическую обработку кромок и их подготовку под сварку [7]. При ИДСПЭ в аргоне и гелии стыковых соединений сплава 1201 толщиной (4 + 4) мм на съемной подкладке, (4 + 10) мм в замок и свыше 50 мм в щелевую разделку достигается образование минимальной зоны термического влияния [8]. При этом расширяется диапазон рабочих токов сварки и обеспечивается необходимое проплавление металла с сохранением постоянной ширины шва и усиления.

Способ ИДСПЭ широко применяется для изготовления топливных баков летательных аппаратов из сплава 1201 и заготовок шпангоутов из сплава АМг6 [9]. Внедрение технологии ИДСПЭ днищ топливных баков летательных аппаратов из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 70 мм в гелии вместо ручной аргонодуговой сварки обеспечило снижение дефектов в сварных швах на

30...40 % и увеличение производительности сварочных работ в 4...5 раз. В указанной технологии использовали источник импульсного тока дуги, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона, реализующий концепцию двухступенчатого импульса тока [10]. Ступень низкого тока импульса с амплитудой I_n и длительностью t_n позволяет расплавлять заданный объем металла на торце электрода, а ступень высокого тока импульса с амплитудой I_b и длительностью t_b дает возможность переносить расплавленную каплю во всех пространственных положениях (рис. 1). Базовый ток I_0 поддерживает горение дуги, а плавная регулировка сварочного тока происходит за счет изменения частоты импульсов $f = 1/T$ (где T — период импульсов) (рис. 1).

Известно, что при сварке углеродистых и низколегированных сталей разбрызгивание металла является одним из важных показателей процесса. При сварке в углекислом газе (в зависимости от динамических характеристик источника питания дуги, диаметра электродной проволоки и тока сварки) диапазон потерь электродного металла на угар и разбрызгивание составляет 4,5...12,0 %. При сварке на постоянном токе в смеси на основе аргона, например 82 % Ar + 18 % CO₂, этот показатель снижается до 2,5...6,5 %, а при ИДСПЭ в той же смеси потери еще ниже (1,0...1,5 %). Разбрызгивание металла при таком способе сварки не зависит от сварочного тока и диаметра электродной проволоки, и при оптимальных для данного режима параметрах импульсов сохраняется минимальным во всем диапазоне сварочных токов [11]. В работе [12] отмечается, что ИДСПЭ можно рекомендовать для сварки металлоконструкций из низколегированных сталей, на которых не допускается наличие приваренных брызг электродного металла, тонколистового металла и выполнения швов малого сечения, а также для сварки и наплавки, если необходимо обеспечить небольшую долю основного металла в металле шва. Высокий уровень механических свойств металла швов, выполненных на сталях типа 09Г2С и 15Г2АФ, достигается за счет незначительного содержания неметаллических включений и формирования бла-

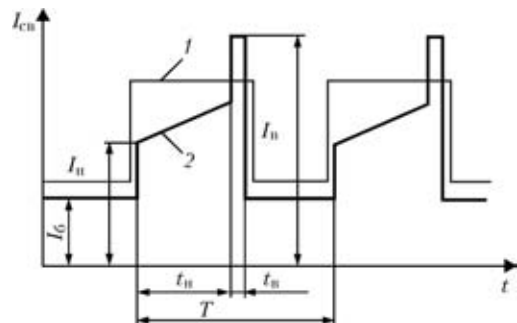


Рис. 1. Импульсы сварочного тока (текущее значение) при ИДСПЭ: 1 — прямоугольные; 2 — двухступенчатые



гоприятной структуры с преобладанием игольчатого феррита. При этом формируется более мелкозернистая микроструктура металла шва, чем при сварке стационарной дугой, а также отмечаются высокие значения ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах [13]. В работе [14] указывается на эффективное применение автоматической ИДСПЭ в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ проволокой диаметром 1 мм для изготовления деталей редукторов.

ИДСПЭ позволяет улучшить сварку легированных сталей в вертикальном и потолочном положениях. Благодаря повышению стабильности процесса сварки и мелкокапельному переносу металла можно выполнять качественную сварку на токах, имеющих значения ниже критического, что позволяет соединять тонкий металл проволоками диаметром 1,6 и 2,0 мм. Установлено, что при ИДСПЭ склонность металла швов, выполненных на стали X18Ni10T, к образованию пор и шлаковых включений меньше, чем при обычной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом [15]. Микроструктура металла шва измельчена по сравнению с полученной обычной сваркой, наблюдается уменьшение зоны термического влияния. При этом механические свойства металла швов неходятся на уровне швов, выполненных сваркой неплавящимся электродом.

Как известно, образование горячих трещин на сталях может быть снижено за счет использования режимов с минимальным выделением теплоты [16]. Поскольку при ИДСПЭ средние значения сварочного тока ниже, чем при сварке на постоянном токе, и возможно использование проволок большего диаметра, то опасность образования горячих трещин уменьшается. Эффективна полуавтоматическая ИДСПЭ легированных сталей, чувствительных к образованию горячих трещин, особенно при большой толщине изделий. В работе [17] приведен пример использования ИДСПЭ для получения сварных соединений сталей G-X5CrNi174 (17 % Cr и 4 % Ni) и T1St E 355 без горячих трещин на спиральном корпусе турбины насоса высокого давления. Здесь же описаны технологические особенности и преимущества ИДСПЭ разгрузочного шнека из хромоникелевой стали, а также элементов лопастей крупногабаритной мешалки из стали X10CrNiMoTi 1810. Отмечено, что ИДСПЭ применяется во всех пространственных положениях несущих конструкций из хромоникелевых сплавов толщиной 10...40 мм.

Оборудование и технология ИДСПЭ используются для соединения сплавов на основе меди и титана. ИДСПЭ в аргоне применяли при заварке трещин и раковин на деталях судовых устройств из сплавов меди без демонтажа. В работе [18] отмечено, что при ИДСПЭ в аргоне латуни ЛМцЖ55-3-1 и бронзы Бр.АМц9-2 толщиной

16...24 мм в вертикальном и потолочном положениях улучшается формирование швов, уменьшается вероятность появления несплавлений, а также измельчается микроструктура металла швов.

Мелкокапельный перенос металла и снижение критического тока сварки при ИДСПЭ приобретают особое значение при получении соединений титана для обеспечения надежной защиты зоны сварки [19]. С увеличением скорости сварки сокращаются ширина зоны разогрева металла и время его пребывания при высоких температурах, что приводит к снижению сварочных деформаций и улучшению условий защиты от окисления металла шва и обратной стороны сварного соединения. В работе [20] авторы указывают, что при ИДСПЭ титановых листов толщиной 6 мм, к которым в свободном состоянии приваривали ребра с V-образной несимметричной разделкой кромок, повышается производительность и значительно уменьшаются угловые деформации (в 2 раза по сравнению с ручной сваркой неплавящимся электродом). Механические свойства сварных соединений не уступают соединениям, полученным аргонодуговой сваркой. ИДСПЭ позволяет осуществлять сварку титановых сплавов в монтажных условиях в разных пространственных положениях, стабилизировать проплавление, практически устранить разбрызгивание, обеспечить высокие показатели пластичности, прочности и ударной вязкости [21, 22].

Развитие трубопроводного транспорта наряду с высокими показателями механических свойств сварных соединений и увеличением производительности сварочных работ требует применения прогрессивных высокотехнологичных способов сварки. В Канадском институте сварки разработана ИДСПЭ с системой контроля длины дуги [23]. В работах [24, 25] сообщается, что при сооружении магистрального трубопровода при сварке неповоротных стыков для укладки шва, следящего за корневым швом, применение ИДСПЭ с запатентованной функцией контроля дуги позволило уменьшить количество дефектов типа несплавлений благодаря улучшению характеристик переноса металла и повысить вязкость металла швов при критическом раскрытии вершины трещины.

В работе [26] предложена ИДСПЭ корневых швов порошковой проволокой с металлическим сердечником в смесях 80 % Ar + 20 % CO₂ или 85 % Ar + 15 % CO₂, а также Ar + 1...5 % O₂. Такая технология позволяет избежать возникновения дефектов типа несплавлений и дает возможность сварщику управлять длиной дуги. В отличие от электродной проволоки сплошного сечения порошковая проволока с металлическим порошком способствует получению более широкой свароч-

ной дуги, при этом увеличивается сплавление и эффективно используются преимущества управляемого капельного переноса металла.

Известен опыт применения ИДСПЭ совместно с чередующейся подачей защитных газов [27, 28]. Такой способ сварки низколегированной стали, например 09Г2, позволяет по сравнению с только ИДСПЭ или со сваркой на постоянном токе уменьшить размер зерна на участке перегрева и увеличить содержание игольчатого феррита [27]. Схема такого процесса представлена на (рис. 2). При этом частота подачи защитных газов в зону сварки составляет 1...5 Гц.

В последнее время для сварки в защитных газах активно внедряется так называемая двухдуговая ИДСПЭ [29, 30]. Фирма «Fronius» является одной из передовых в реализации технологии двухдуговой импульсной сварки на установке «Time Twin Digital». Рекомендуемыми областями применения такой установки являются не только автомобильная промышленность и сооружение трубопроводов, но и судостроение, включая работы в открытом море.

В Кренфильдском университете (Великобритания) разработана автоматизированная сварка трубопроводов в сложных условиях окружающей среды, а также при низких температурах. Отмечается, что использование импульсов с соответствующими параметрами позволяет повысить производительность сварки неповоротных стыков при строительстве трубопроводов [30].

В работе [31] исследуется процесс импульсной двухдуговой сварки алюминиевых сплавов и на основании полученных результатов сделан вывод о целесообразном его использовании при односторонней сварке стыковых, замковых, тавровых и нахлесточных тонколистовых соединений, когда необходимо получать швы с большими катетами.

Пока не существует единого мнения о способах стабилизации импульсных дуг при двухдуговой сварке. Предлагаются различные варианты, например, режимы в противофазе, очень малое фазовое смещение или его отсутствие. В работах [32, 33] описан способ синхронизации импульсов с запаздыванием около 0,5 мс импульсного тока задней дуги относительно передней. При этом управление длиной передней дуги выполняется системой частотно-импульсной модуляции, а длиной задней дуги — системой задержки амплитуды импульса. Обращено внимание на такие важные факторы, как расстояние между дугами и допустимое содержание углекислого газа в смеси на основе аргона. В работе [34] установлено, что при двухдуговой сварке импульсными дугами низкоуглеродистой и нержавеющей сталей для обеспечения стабильности процесса необходим незначительный (до 1 мс) фазовый сдвиг между дугами.

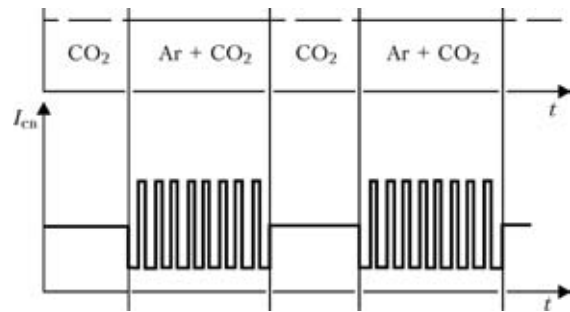


Рис. 2. Схема ИДСПЭ с модуляцией по току и виду защитных газов

В настоящее время развивается способ лазерно-дуговой сварки, который позволяет по сравнению с обычной сваркой в защитных газах достигать высоких скоростей сварки, получать более глубокое проплавление и хорошие механические свойства сварных соединений. При этом использование дугового процесса снижает мощность пучка лазера, что приводит к уменьшению стоимости всей установки. Такие технологии находят применение в автомобильной промышленности [35]. Из-за низкого разбрызгивания, характерного для ИДСПЭ, использование этого способа в указанных технологиях предпочтительнее, поскольку исключается загрязнение оптической системы лазера. Существует опыт применения высокоскоростной сварки (двухдуговая ИДСПЭ + импульсная дуга-лазер) листов большой толщины. В этой технологии используются уже три импульсные дуги с плавящимся электродом [36].

Таким образом, обзор областей и масштабов применения ИДСПЭ доказывает высокую эффективность применения этого способа для соединения различных материалов, когда необходимо обеспечить управляемый перенос металла электрода во всех пространственных положениях с небольшими потерями на разбрызгивание. Актуальность применения данного способа сварки подтверждается современным развитием технологии и сварочного оборудования, базирующихся на нем.

1. Патон Б. Е., Потапьевский А. Г., Подола Н. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса // Автомат. сварка. — 1964. — № 1. — С. 1–6.
2. Потапьевский А. Г., Лапчинский В. Ф., Вайнерман А. Е. Импульсно-дуговая сварка алюминиевых сплавов. Сер. Прогрессивное формообразование. — Л.: Об-во «Знание», 1966. — 46 с.
3. Вороний Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н. Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 26–32.
4. Kiesche M. Einsatz des MIG-Impulsschweißverfahrens beim Schweißen von Fahrzeugaufbauten aus Aluminiumlegierungen // ZIS-Mitteilungen. — 1982. — 24, № 6. — S. 669–674.
5. Сварной алюминиевый кузов автомобильного полуприцепа-минераловоза / В. Г. Игнатъев, Ю. Г. Каплуненко, М. П. Пашуля и др. // Сварка цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 39–42.



6. Барабохин Н. С., Шиганов Н. В., Иванов В. Я. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом сплава АМг6 больших толщин // Свароч. пр-во. — 1973. — № 3. — С. 16–18.
7. Импульснодуговая сварка плавящимся электродом замковых соединений из сплава АМг6 / В. В. Слюсаревский, Д. Г. Луцай, В. К. Лайков и др. // Автомат. сварка. — 1981. — № 7. — С. 49–50.
8. Сварка плавящимся электродом сплава 1201 / Ю. А. Рябец, В. И. Завирюха, В. А. Остапов и др. // Сварка цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 28–32.
9. Сварка конструкций летательных аппаратов из алюминиевых сплавов больших толщин / О. Н. Кудряшов, О. М. Новиков, И. В. Алексеев и др. // Свароч. пр-во. — 2001. — № 12. — С. 31–33.
10. А. с. 4696750/27 СССР, МКП⁵ В 23 К 9/09. Источник тока для импульсно-дуговой сварки / В. М. Павшук, П. П. Шейко. — Оpubл. 07.10.91, Бюл. № 37.
11. Killing R. Schutzgase zum Lichtbogenschweißen — schweißtechnische Eigenschaften // Praktiker. — 1993. — № 8. — S. 448–455.
12. Импульснодуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом / С. Т. Римский, В. Г. Свещинский, П. П. Шейко и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 2. — С. 38–41.
13. Бучинский В. Н., Вороний Н. М. Особенности импульснодуговой сварки сталей в смеси аргона с углекислым газом // Там же. — 1978. — № 3. — С. 42–45.
14. Bouandel M. Getriebeteil vollmechanisch metall-aktievogeschweißt // Praktiker. — 1991. — 43, № 11. — S. 612, 614.
15. Потапьевский А. Г., Бучинский В. Н. Импульсно-дуговая сварка нержавеющей стали X18H10T // Автомат. сварка. — 1965. — № 9. — С. 30–33.
16. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
17. Aichele G. Die Anwendung der Impulstechnik — Metall-Aktivgasschweißen // Praktiker. — 1989. — 41, № 4. — S. 174, 177, 178.
18. Импульсно-дуговая сварка сплавов меди / Л. А. Агарков, А. Г. Потапьевский, А. А. Будай, А. П. Таран // Судостроение. — 1968. — № 9. — С. 63–66.
19. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / Под ред. В. Н. Замкова. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
20. Полуавтоматическая импульсно-дуговая сварка титановых сплавов плавящимся электродом / Б. В. Кудояров, А. А. Николаев, В. М. Поляков, Э. И. Явно // Свароч. пр-во. — 1970. — № 11. — С. 17–19.
21. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов / Отв. ред. В. Н. Замков. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
22. Блащук В. Е., Шеленков Г. М. Сварка плавлением титана и его сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2005. — № 2. — С. 38–46.
23. The development and application of pulsed FM-GMA welding / A. Ditschun, D. Dorling, A. Glover et al. // First Intern. conf. on advanced welding systems, London, 19–21 Nov., 1985. — Abington, 1987. — P. 301–309.
24. Dorling D. Applying pulsed GMA welding to pipeline construction // Welding J. — 1992. — 71, № 10. — P. 39–44.
25. Gas metal arc welding used on mainline 80 ksi pipeline in Canada / D. V. Dorling, A. Loyer, A. N. Russell, T. S. Thompson // Ibid. — 1992. — 71, № 5. — P. 55–61.
26. Sol A. M. Pulsed MIG metal-cored wire welding replaces TIG root pass // Joining and Materials. — 1989. — № 7. — P. 372–376.
27. Шейко П. П., Жерносеков А. М., Шевчук С. А. Технологические особенности сварки плавящимся электродом низколегированных сталей с чередующейся подачей защитных газов // Автомат. сварка. — 1997. — № 8. — С. 32–36.
28. Kusch M. Metall-Innertgasschweißen von Aluminium mit gepulster Schutzgaszufuhr // Schweißen und Schneiden. — 2006. — 56, № 1. — S. 19–22.
29. Martin M. MAG-Tandemschweißen fuer die Plattierung aus Alloy B2 // Praktiker. — 2002. — № 11. — S. 404–407.
30. Автоматизированная сварка трубопроводов: Сварка за рубежом // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 52–56.
31. Иценко А. Я., Машин В. С., Паулюя М. П. Технологические особенности двухдуговой импульсной сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов // Там же. — 2005. — № 1. — С. 14–18.
32. Occurrence of arc interference and interruption in tandem pulsed GMA welding—study of arc stability in tandem pulsed GMA welding (Rep. 1) / T. Ueyama, T. Ohnawa, M. Tanaka, K. Nakata // Quarterly J. of Japan Welding Soc. — 2005. — 23, № 4. — P. 515–525.
33. Solution to problem of arc interruption and stable arc length control in tandem pulsed GMA welding—study of arc stability in tandem pulsed GMA welding (Rep. 2) / T. Ueyama, T. Ohnawa, T. Uezono et al. // Ibid. — 2005. — 23, № 4. — P. 526–535.
34. Tandem MIG/MAG welding / S. Goecke, J. Xedegard, M. Lundin, H. Kaufmann // Svetsaren. — 2001. — 56, № 2/3. — P. 24–28.
35. Штайффер Х., Хакль Х. Лазерно-дуговая сварка в автомобильной промышленности // Автомат. сварка. — 2001. — № 12. — С. 29–32.
36. Staufner H., Ruehrnoeßl M. Fuer große Blechdicken und hohe Schweißgeschwindigkeiten: Laserhybrid- + Tandemschweißen // Praktiker. — 2006. — № 10. — S. 300–302.

Analysis of the field and peculiarities of application of pulsed-arc metal-electrode welding of different materials is described, and trends and prospects of its development are considered. It is shown that this welding method is characterised by certain technological advantages over other gas-shielded metal-electrode welding methods, and is extensively applied in modern high-productivity technologies.

Поступила в редакцию 10.05.2007