



ОДНОПРОХОДНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА ЗАКЛАДНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ МЕТАЛЛА БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

Г. В. КУЗЬМЕНКО, инж., **В. Г. КУЗЬМЕНКО**, д-р техн. наук, **В. И. ГАЛИНИЧ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. В. ОТРОКОВ, инж., **М. А. ЛАКТИОНОВ**, канд. техн. наук (Сумское НПО им. М. В. Фрунзе)

Проанализированы способы сварки, применяемые в промышленности для соединения металла большой толщины. Отмечены преимущества введения электродного металла в стык до сварки и показана возможность устойчивого горения дуги в зазоре менее 2 мм. Для компенсации дефицита присадочного металла, возникающего в процессе образования шва, предложено через каналы в пластинчатом электроде вводить дополнительный присадочный материал. Новый способ автоматической однопроходной электродуговой сварки металла большой толщины получил название электродуговой сварки закладным электродом. Приведены технико-экономические характеристики нового способа сварки в сравнении с существующими и примеры использования его для сварки сталей различных марок.

Ключевые слова: электродуговая сварка, металл большой толщины, пластинчатый электрод, узкий зазор, сварка в монтажных условиях

При сварке металла большой толщины используются как однопроходные (электрошлаковая сварка и дуговая сварка с принудительным формированием), так и многопроходные (сварка под флюсом и в среде защитных газов) технологии. Однопроходные способы сварки отличаются высокой производительностью, но зачастую не обеспечивают требуемый уровень механических свойств сварного соединения вследствие перегрева металла шва и околошовной зоны. Многопроходные способы сварки позволяют получить высокий уровень механических свойств сварного соединения, но за счет существенного снижения производительности процесса. При этом достаточно велика вероятность образования дефектов — несплавлений и шлаковых включений. В последнее время получили развитие способы сварки в узкий зазор металла большой толщины. Однако требуемая точность введения электродной проволоки в глубокий и узкий зазор значительно ужесточает требования к сварочному оборудованию, а также усложняет технику сварки [1–5].

Кроме приведенных выше примеров использования известных технологий для сварки металла большой толщины, многие исследователи предлагали также технические решения, в которых электродный металл в виде пластин вводили в стык до сварки. Такой прием в отличие от общепринятого (когда электродный металл подается в виде проволоки снаружи стыка) имеет определенные преимущества в плане уменьшения сварочного зазора, упрощения оборудования и тех-

ники сварки. В работе [6] предложено вводить в зазор и зажимать между свариваемыми кромками плоский электрод, покрытый обмазкой, после чего между концом электрода и свариваемыми деталями возбуждать дугу, которая, перемещаясь самостоятельно по торцу электрода, должна проплавливать весь стык. Недостатками этого способа является отсутствие компенсации дефицита электродного металла, возникающего по мере образования шва.

Применительно к сварке металла толщиной до 40 мм известен способ «туннельной» сварки [7], согласно которому в стык вводится покрытый плавящийся мундштук овального сечения, через который дополнительно подают стальную ленту, компенсирующую дефицит электродного металла в стыке. Авторы считают, что этот способ сварки пригоден для выполнения коротких швов во всех пространственных положениях, однако при этом требуется дополнительное применение формирующих подкладочных средств и флюса для укрытия зоны сварки.

В патенте США [8] предложено выполнять автоматическую электродуговую сварку стыковых соединений большой толщины без разделки кромок с использованием введенного в стык пластинчатого электрода, толщина которого составляет 2,4...7,9 мм, а ширина примерно равна толщине свариваемых листов. Сварку выполняют в вертикальном положении снизу вверх. Пластинчатый электрод имеет сравнительно тонкое (0,25...1,25 мм) керамическое покрытие, отличающееся диэлектрическими свойствами. При сборке под сварку электрод с покрытием целиком заполняет зазор между свариваемыми кромками по всей его длине. Для получения шва, соответствую-

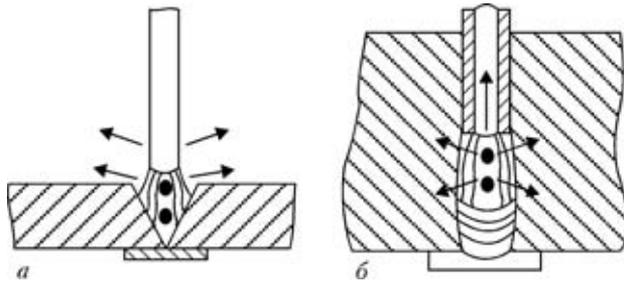


Рис. 1. Схема горения дуги в открытом (а) и закрытом (б) пространстве стыка

ющего размерам детали, длина электрода должна быть на 10...25 % больше свариваемого стыка, а его подачу необходимо осуществлять в процессе сварки. Чтобы воспрепятствовать вытеканию жидкого металла стык с обеих сторон закрывается водоохлаждаемыми медными башмаками. Покрытие на пластинчатый электрод предлагается наносить путем окунания, напыления или применять стеклоткань.

И. В. Зуев [9] для сварки толстого металла переменного сечения предлагает использовать плоский неподвижный плавящийся электрод соответствующего профиля, предварительно введенный в стык. Он связывает режимы сварки со значениями избыточного давления паров расплавленного металла, скоростью распространения звука в металле электрода, сечением электрода и безразмерным коэффициентом Грюнайзена. И. В. Зуев с сотрудниками [10] исследовали также характер перемещения дуги при дуговой сварке металлов неподвижным плавящимся электродом. Недостатками указанного способа являются отсутствие рекомендаций по стабилизации горения дуги в узком зазоре и невозможность осуществлять сварку протяженных швов из-за возникающего при заполнении стыка дефицита электродного металла.

Хотя предложенные способы сварки по тем или иным причинам не нашли промышленного применения, на наш взгляд, во всех них содержится рациональное зерно — использование плоского плавящегося электрода, предварительно введенного в зазор между свариваемыми кромками. Если предположить, что в процессе сварки будет обеспечено устойчивое горение дуги и равномерно-последовательное плавление плоского электрода с надежным оплавлением кромок стыка, то такой способ сварки может успешно использоваться для неразъемного соединения металла достаточно большой толщины. При этом пластинчатый электрод, введенный в стык, будет выполнять функцию устройства, задающего своеобразную «программу» самостоятельного движения дуги. Это позволяет отказаться от перемещения ее вдоль стыка, который используется во многих существующих способах электродуговой сварки. Поло-

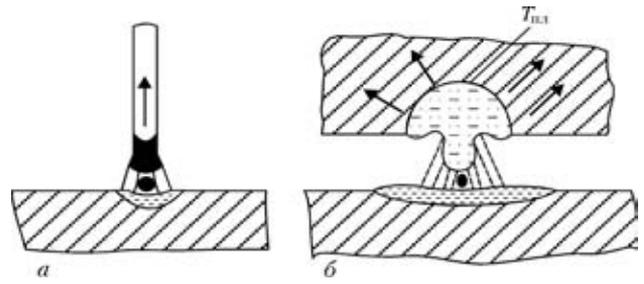


Рис. 2. Схемы плавления электродного металла при использовании проволочных (а) и пластинчатых (б) электродов ($T_{пл}$ — температура плавления)

жительным фактором такого технологического приема является возможность более полного использования тепла дуги за счет ее горения в закрытом пространстве стыка, сопоставимого по ширине с размерами столба дуги (рис. 1). В результате этого, а также благодаря развитому сечению электрода достигается высокая эффективность его плавления (рис. 2) [11], и как следствие можно ожидать ограничения парообразования путем снижения температуры сварочной ванны [12] по сравнению с аналогичными дуговыми способами сварки с использованием проволочного электрода.

Возможность введения процесса сварки с предварительным заполнением стыка электродным металлом определяется надежностью электрической изоляции электрода от свариваемых деталей в исходном состоянии и в процессе сварки, а также стабильностью горения дуги в узком зазоре. Эти условия могут обеспечиваться за счет выбора соответствующего состава изолирующего покрытия, включающего компоненты, при нагреве образующие поток из газа, пара и шлака, который оттесняет дугу от свариваемых кромок (рис. 3). Чтобы оценить, насколько эффективен такой механизм стабилизации горения дуги, нами проведена экспериментальная сварка двух пластин из низ-

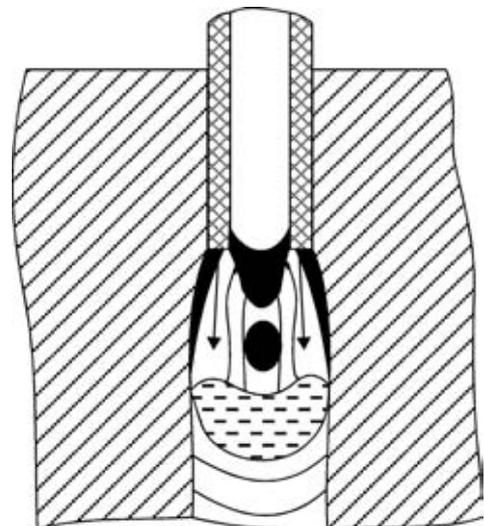


Рис. 3. Схема стабилизации и экранирования электрической дуги в узком зазоре при ее горении на торце пластинчатого изолированного электрода за счет действия потока газа, пара или шлака (показано стрелками)

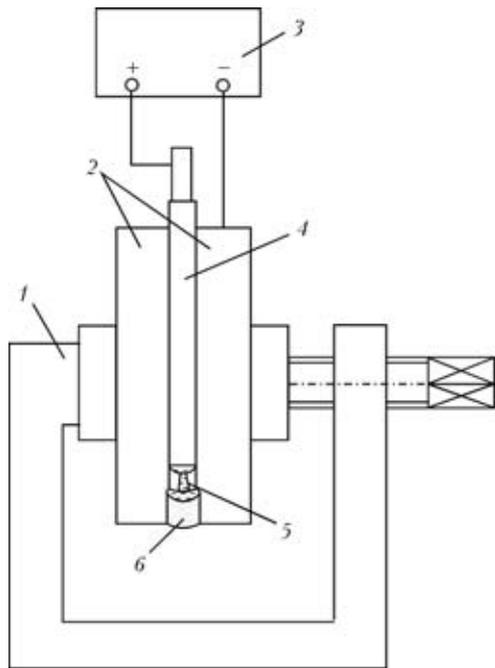


Рис. 4. Схема сварки стыка пластин с зазором 1,5 мм: 1 — трубка; 2 — свариваемые части; 3 — источник тока; 4 — пластинчатый электрод; 5 — электрическая дуга; 6 — сварной шов

коуглеродистой стали (рис. 4). Размер их свариваемых поверхностей составлял 100×150 мм, зазор — 2 мм, пластинчатый электрод толщиной 2 мм был покрыт тонким (0,2 мм) слоем изолирующего материала (конденсаторная бумага, политетрафторэтилен), для которого характерно разложение газообразных продуктов при нагреве. Электрод зажимали между шлифованными поверхностями образцов и подключали к источнику сварочного тока типа ВДУ-1201. Между концом электрода и свариваемыми пластинами возбуждалась дуга, которая, перемещаясь по торцу электрода, последовательно его переплавляла. Таким образом удалось получить сварное соединение (рис. 5) с очень узким (около 2 мм) швом. Однако качество сварного соединения оказалось неудовлетворительным из-за ограниченных возможностей металлургического воздействия на металл шва. Избавиться от пористости и науглероживания шва с помощью указанных выше изолирующих материалов не удалось. Кроме того, даже в случае применения очень тонкого покрытия по мере плавления электрода в стыке неизбежно накапливался дефицит электродного металла, в результате чего в металле шва возникали дефекты в виде пустот и несплавлений. Поэтому в дальнейшем толщину сердечника электрода увеличили до

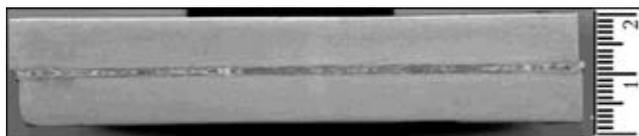


Рис. 5. Вид стыка после электродуговой сварки закладным электродом (зазор — 1,5 мм)

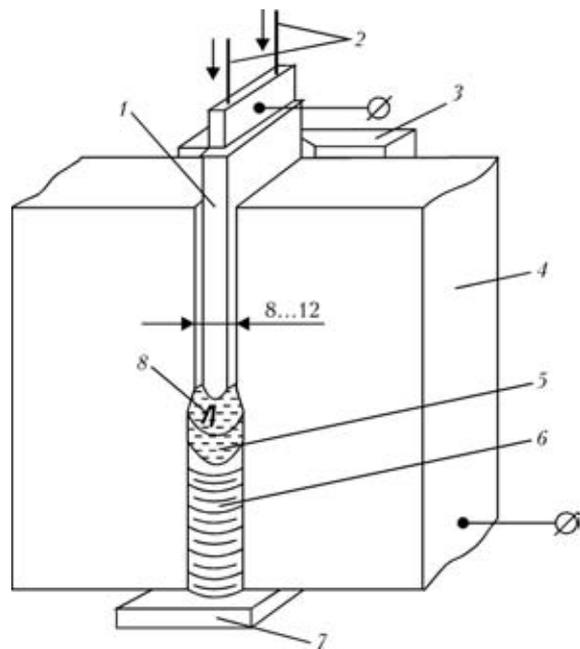


Рис. 6. Схема электродуговой сварки закладным электродом: 1 — закладной электрод; 2 — присадочная проволока; 3 — формирующая накладка; 4 — свариваемое изделие; 5 — сварочная ванна; 6 — сварной шов; 7 — подкладка; 8 — дуга

4...6 мм, что позволило выполнить в нем продольные каналы для подачи дополнительного электродного металла. В качестве изолирующего материала применяли керамическое покрытие толщиной 0,8...1,5 мм, в состав которого в определенном соотношении вводили оксиды, фториды и карбонаты, а также необходимые раскислители. Это позволило упростить требования к качеству подготовки свариваемых кромок и сборке стыка, обеспечить надежную изоляцию электрода и активно влиять на металлургические процессы в сварочной ванне.

На основе рассмотренных выше литературных данных и результатов проведенных нами исследований предложен новый способ однопроходной дуговой сварки в узкий зазор, получивший название электродуговой сварки закладным электродом (рис. 6) [13, 14]. Суть этого способа сварки заключается в следующем. Свариваемые детали без разделки кромок собирают с некоторым зазором, в который вводится изолированный плавящийся электрод с сердечником в виде пластины шириной, равной толщине деталей. Сердечник имеет продольные каналы, через них для компенсации дефицита металла в процессе сварки подаются присадочные проволоки или ленты. С обе-



Рис. 7. Вид оплавленного торца закладного электрода при электродуговой сварке металла толщиной 30 мм (толщина металлической части электрода — 6 мм, покрытия — 1,2 мм)

Таблица 1. Сравнительные показатели различных способов сварки

Параметр	Электродуговая сварка закладным электродом	Электродуговая сварка	Электродуговая сварка с принудительным формированием
Толщина металла, мм	20...100	20...200	12...60
Зазор, мм	8...12	20...40	12...25
Напряжение, В	24...30	36...55	28...48
Сварочный ток, А	400...1000	400...1200	300...700
Скорость сварки, м/ч	2,0...8,0	0,5...2,2	1,0...7,0
Удельное время сварки, с/см ²	1,0...5,0	2,3...20,0	2,4...13,0
Удельная энергоёмкость, кДж/см ²	25...50	100...400	40...150
Удельная материалоемкость, г/см ²	6,3...9,4	15,7...31,4	9,4...19,6

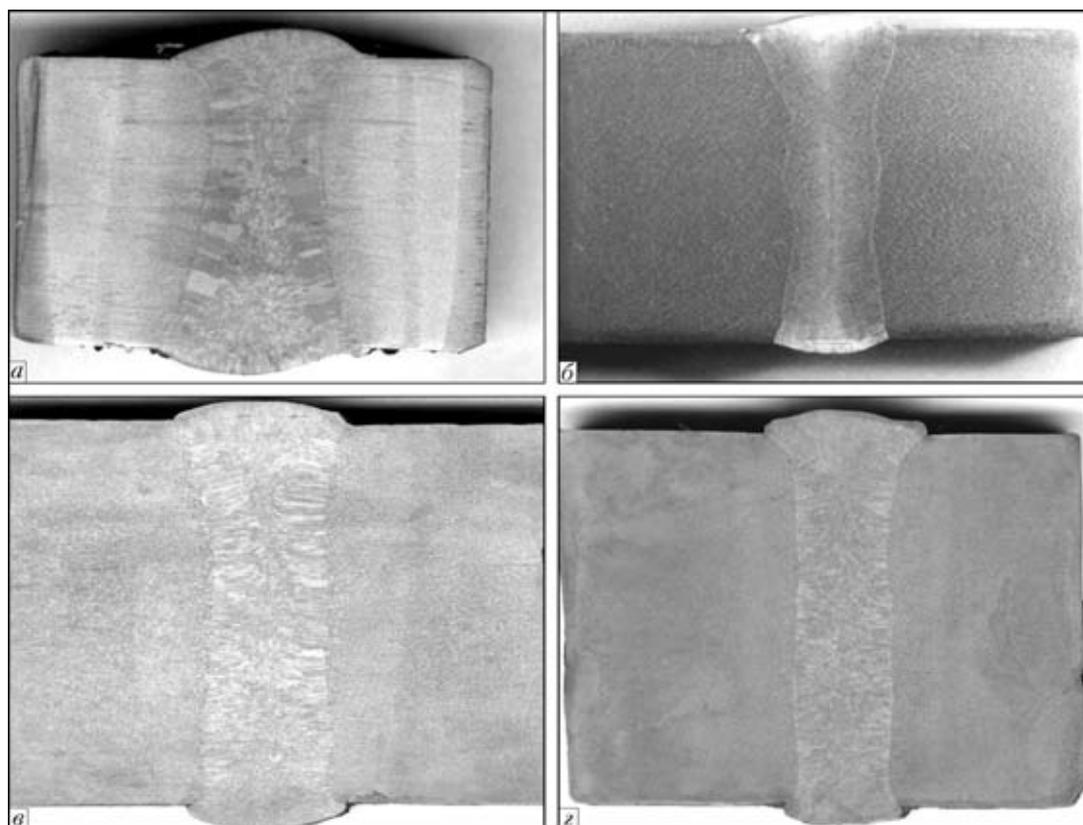


Рис. 8. Макрошлифы соединений, полученных электродуговой сваркой закладным электродом (один проход) на стали 10ХСНД толщиной 30 мм (а), 08Х17Н13М2Т толщиной 38 мм (б), 09Г2С толщиной 60 мм (в) и СтЗсп толщиной 60 мм (z)

их сторон свариваемый стык закрыт формирующими накладками. Дуга возбуждается на нижнем конце закладного электрода и, перемещаясь по его торцу, горит в пространстве, ограниченном кромками свариваемых деталей и поверхностями формирующих накладок. Под действием тепла, создаваемого дугой, происходит нагрев и плавление электрода, присадочного металла и кромок свариваемых деталей, в результате чего образуется сварной шов. Несмотря на беспорядочное перемещение по торцу электрода дуга обеспечивает устойчивое и равномерное его плавление (рис. 7). Этот эффект можно объяснить исходя из принципа Штеенбека [15], согласно которому дуга в основном горит там, где создаются условия для

ее функционирования при минимальном напряжении. Одним из основных факторов, стимулирующих перемещение дуги по торцу электрода, является увеличение расстояния между торцом электрода и сварочной ванной в результате его плавления.

При этом способе сварки за счет использования пластинчатого закладного электрода зазор между кромками составляет 8...12 мм при толщине свариваемых деталей 20...100 мм, благодаря чему обеспечивается достаточно высокая производительность процесса (суммарный коэффициент расплавления электродного и присадочного металла равен 22 г/(А·ч) и умеренное (25...50 кДж/см²) удель-



Таблица 2. Химический состав (мас. %) и механические свойства (средние значения) металла шва, выполненного на различных типах сталей

Марка стали (толщина, мм)	Массовая доля элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
10ХСНД (20)	0,08	0,52	1,14	0,32	1,10	0,41	0,28
10ХСНД (30)	0,09	0,44	1,19	0,29	1,21	0,46	0,26
Ст3сп (30)	0,13	0,37	0,98	0,11	0,07	0,04	—
Ст3сп (50)	0,11	0,35	0,92	0,09	0,12	0,07	—
09Г2С (60)	0,09	0,52	1,69	0,24	0,09	0,21	—
08Х17Н13М2Т (38)	0,04	0,82	0,97	19,0	12,10	1,86	—

Окончание табл. 2

Марка стали (толщина, мм)	Механические свойства металла шва (средние значения)						
	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCU , Дж/см ²		KCV , Дж/см ²	
				-40 °С	-60 °С	+20 °С	-20 °С
10ХСНД (20)	415	585	28	—	—	126	82
10ХСНД (30)	410	590	27	—	—	105	78
Ст3сп (30)	365	490	29	78	—	—	—
Ст3сп (50)	362	485	39	86	—	—	—
09Г2С (60)	390	570	28	101	75	—	—
08Х17Н13М2Т (38)	320	565	38	—	> 360	—	—

ное тепловложение. В табл. 1 приведены показатели нового способа сварки.

Электродуговая сварка закладным электродом опробована нами при сварке образцов из низкоуглеродистых (Ст3), низколегированных (09Г2С, 10ХСНД, 16Г2АФ) и высоколегированных коррозионноустойчивых (08Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т) сталей толщиной от 20 до 100 мм. Эксперименты показали, что предложенный способ сварки отличается высокой надежностью и позволяет получать сварные швы на сталях исследуемой толщины практически без дефектов — трещин, неплавления, пор и шлаковых включений (рис. 8). Полученные сварные швы имеют механические свойства не ниже основного металла. Даже при температуре испытания -60 °С металл шва, выполненного на низколегированных сталях, характеризуется высокой (70...80 Дж/см²) ударной вязкостью, несмотря на минимальный уровень легирования (табл. 2).

По нашему мнению, электродуговая сварка закладным электродом найдет широкое применение при изготовлении толстостенных (20...100 мм) сварных конструкций с относительно короткими (до 1000 мм) швами благодаря своей экономичности и простоте используемого оборудования. Она сможет стать альтернативой традиционным способам сварки.

Выводы

1. Предложен новый способ автоматической однопроводной электродуговой сварки закладным

электродом металла толщиной 20...100 мм, который выполняется в вертикальном положении свариваемых деталей и предназначен в основном для сварки коротких (до 1000 мм) швов, в том числе в монтажных условиях.

2. Применение пластинчатого плавящегося электрода с изолирующим покрытием позволяет уменьшить зазор между свариваемыми кромками до 8...12 мм, благодаря чему значительно улучшаются технико-экономические показатели процесса сварки металла.

3. Компенсация дефицита электродного металла при сварке может обеспечиваться как постепенной (по мере оплавления) подачей пластинчатого электрода к сварочной ванне, так и вводом через его каналы проволок или пластин.

4. Соответствие размеров пластинчатого изолированного электрода размерам стыка и особенности горения дуги (принцип Штеенбека) на торце пластинчатого электрода задают «программу» ее самостоятельного перемещения в узком зазоре, обеспечивающую равномерное оплавление кромок свариваемых частей и образование плотного шва. Это исключает необходимость применения специальных устройств для перемещения электрода вдоль стыка и значительно упрощает используемое оборудование.

1. Технико-экономическое сопоставление различных способов сварки толстолистового металла / А. Н. Серенко, А. И. Патрикеев, В. А. Шаферовский и др. // Свароч. пр. — 1985. — № 12. — С. 3-5.

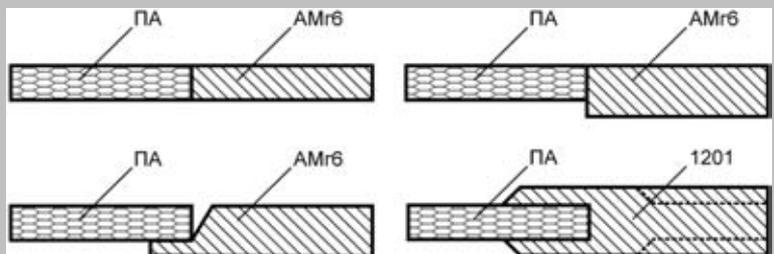
2. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
 3. *Сварка в защитных газах соединений низкоуглеродистых высоколегированных сталей по щелевой разделке* / В. К. Лебедев, Н. И. Каховский, В. С. Савченко, В. Ю. Кондратьев // *Автомат. сварка.* — 1977. — № 5. — С. 1–5.
 4. *Технологические возможности сварки под флюсом в узкий зазор среднелегированных сталей большой толщины* / Б. С. Касаткин, А. К. Царюк, Н. Е. Левенберг, Н. В. Филипенко // Там же. — 1984. — № 7. — С. 41–44.
 5. *Терещенко В. И., Либанов А. В.* Выбор и применение способов сварки при изготовлении конструкций. — Киев: Наук. думка, 1987. — 192 с.
 6. *А. с. 53628 СССР, МКИ В 23 К 09/09.* Способ электрической дуговой сварки / Ф. Ф. Пашенко. — Заявл. 16.06.37; Опубл 31.08.38.
 7. *Разработка нового способа туннельной дуговой сварки* / К. Iio, А. Osakto, К. Kobayashi, М. Konishi // *Kobe Steel Eng. Repts.* — 1974. — 24, № 3. — Р. 93–99.
 8. *Пат. 3646312 США, МКИ В 23 К 35/22.* Electrodes for welding and the like / Н. Е. Cable, Н. Е. Cable. — Опубл. 29.02.72.
 9. *Пат. 2115521 РФ, МКИ В 23 К 9/173 9/10.* Способ электродуговой сварки изделий сложного профиля и устройств / И. В. Зуев. — Опубл. 20.07.98.
 10. *Движение дуги в узком зазоре при дуговой сварке металлов неподвижным плавящимся электродом* / И. В. Зуев, В. Ф. Кубарев, В. О. Бушма, Р. В. Родякина // *Технология. Приклад. физика.* — 1994. — № 3. — С. 3–7.
 11. *Размышляев А. Д., Багрянский К. В., Нестеренко К. А.* Теплосодержание капель при дуговой наплавке // *Свароч. пр-во.* — 1972. — № 5. — С. 15–16.
 12. *Маликин В. Л., Фрумин И. И.* Средняя температура сварочной ванны при наплавке ленточным электродом под флюсом // *Автомат. сварка.* — 1977. — № 6. — С. 25–28.
 13. *Пат. 2219021 РФ, МКИ В 32 К 9.14, 35/36.* Способ электродуговой сварки плавящимся электродом и электрод для его осуществления / В. Г. Кузьменко, Г. В. Кузьменко. — Опубл. 20.12.2003.
 14. *Пат. 68361 Україна, МПК В 23 К 9/2.* Спосіб електродугового зварювання плавким електродом та електрод для його здійснення / В. Г. Кузьменко, Г. В. Кузьменко. — Опубл. 16.08.2004.
 15. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 333 с.
- Welding methods commercially applied to join heavy metal sections have been analysed. The advantages of introducing the electrode metal into a joint prior to welding are noted, and the possibility of providing a stable arc in gaps less than 2 mm in size is shown. It is suggested that the edge gap should be widened to 8-12 mm, and that the extra filler metal should be introduced through channels in flat electrodes to compensate for the filler metal shortage. A new method is offered for automatic one-pass electric arc welding of heavy metal sections, called embedded-electrode electric arc welding. Technical-economic characteristics of the new process are compared with those of the available processes, and examples of its application for welding different grades of steels are given.

Поступила в редакцию 01.09.2005,
в окончательном варианте 12.01.2006

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПЕНОАЛЮМИНИЯ

Пеноалюминий (ПА) характеризуется уникальным сочетанием таких свойств, которых сегодня не имеет ни один конструкционный материал — негорючесть, нетоксичность, низкие звуко-, тепло- и электропроводность, малая гигроскопичность, легкость, хорошие обрабатываемость и внешний вид. Особенно привлекательно выглядит ПА в сравнении с другими материалами по массе при условии одинаковой жесткости конструкции.

С целью расширения областей применения ПА и создания широкой номенклатуры изделий из него были проведены исследования с использованием различных видов сварки плавлением. Получены соединения листов ПА с монолитными алюминиевыми сплавами различных систем легирования. В качестве заготовок использовали листы из ПА плотностью 0,6...0,7 г/см³ толщиной 4 мм, полученные на основе сплава 1995 (система легирования Al-Zn-Mg).



Результаты экспериментов показали, что соединение заготовок из ПА между собой с использованием сварки плавлением не представляется возможным. Разработана технология соединения ПА через вставки из серийных алюминиевых сплавов. Аналогичная схема соединения может применяться и в других сварных конструкциях, где используются заготовки, полученные как по традиционной технологии, так и из ПА.

Разработаны различные схемы конструктивного оформления кромок для соединения заготовок одинаковой и различных толщин.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 7
Тел.: (38044) 287 44 06, факс: (38044) 287 12 83; 287 46 30