



Долотов Б. И., Клешина О. Н.

B. I. Dolotov, O. N. Kleshnina

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА СВАРКИ ПОГРУЖЕННЫМ ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

FRONTIERS OF THE IMMERSSED TUNGSTEN ELECTRODE WELDING PROCESS

Долотов Борис Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварочного производства» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (КнАГТУ), e-mail: ktsp@knastu.ru.

Mr. Boris I. Dolotov – Doctor of Engineering, Professor, Department of Welding Engineering Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: ktsp@knastu.ru.

Клешина Оксана Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварочного производства» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (КнАГТУ), e-mail: ktsp@knastu.ru.

Ms. Oksana N. Kleshnina – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Welding Engineering Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: ktsp@knastu.ru.

Аннотация. Сварка погруженным вольфрамовым электродом (СПВЭ) обеспечивает наибольшую глубину проплавления за один проход без разделки кромок в сравнении с другими разновидностями сварки в среде инертных газов. Однако и для СПВЭ существуют ограничения связанные со стойкостью электродов и возможностями применяемого сварочного оборудования. Так, специализированная сварочная установка ГСПД-1М укомплектована выпрямителем сварочного тока ВСВ-2000, обеспечивает максимальную глубину проплавления за один проход без разделки кромок изделий из титановых сплавов 40...44 мм. Увеличение толщины под сварку до 50...55 мм с возможностью подхода только с одной стороны и до 100...110 мм при двусторонней сварке выдвигает задачу разработки такой технологии СПВЭ, которая более полно учитывает возможности имеющегося сварочного оборудования. Разработана трехпроходная СПВЭ с использованием комбинированной подготовки свариваемых кромок, сочетающей П-образный вырез и наличие щели.

Summary. The immersed tungsten electrode welding (ITEW) provides the greatest weld penetration in one pass without edge preparation, in comparison with other types of inert gas welding. However, for ITEW there are the restrictions linked to the stability of electrodes and to the capabilities of the welding equipment being used. Thus, a specialized welding installation GSPD-1M is combined with a VSV-2000 rectifier of the welding current providing the maximal weld penetration in one pass without edge preparation for welding items made of titanium alloys 40 - 44 mm. The increase of thickness of welded items up to 50 - 55 mm with an opportunity to approach the item from one side only, and up to 100 - 110 mm for two-side welding brings forth the necessity to develop a new ITEW method that would be better adjusted to the capabilities of the existing welding equipment. We propose a free-pass ITEW relying on the combined preparation of welded edges using both a U-shaped slot and a gap.

Ключевые слова: сварка, вольфрамовый электрод, погружение, титановый сплав, тороидальный электрод, сварочная дуга, сварочный ток, давление дуги, гранулированная присадка.

Keywords: welding, tungsten electrode, immersion, toroidal electrode, welding arc, welding current, arc force, granulated additive.

УДК 621. 791. 75. 01: 537. 523

Высокий темп развития процессов сварки и сварочной техники приводит к появлению новых видов сварки, к которым необходимо отнести сварку погруженным вольфрамовым

электродом (СПВЭ). После появления этого вида сварки эффективность этого процесса возросла в несколько раз, причем его потенциальные возможности остаются слабоизученными.

СПВЭ не требует применения и использования сложного оборудования и по сравнению с другими способами сварки плавлением. Данный способ обладает рядом преимуществ, как технологических, так и экономических: возрастает глубина проплавления свариваемого стыка без разделки кромок за один проход до 25...50 мм; отсутствует необходимость предварительной разделки кромок, вследствие этого процесс подготовки свариваемых элементов и их сборка облегчается и ускоряется; уменьшается расход присадочного материала и удельные энергозатраты; обеспечивается высокое качество сварного шва, сравнимое с качеством сварного соединения при электроннолучевой сварке [1]; СПВЭ применима к большинству конструкционных сплавов; сокращается производственный цикл при высокой производительности труда; возрастает эффективный КПД нагрева металла до величины, сравнимой с электроннолучевой сваркой (0,95).

Однако при использовании различных техник реализации процесса СПВЭ конечные результаты, а это максимально достигаемая толщина детали под сварку, также различаются.

Целью проведенных исследований являлось определение предельных возможностей процесса СПВЭ с использованием различных способов (гранулированной присадки, тороидального электрода и т.п.), которые подробно рассмотрены в работе [2].

Сущность СПВЭ заключается в следующем: заглубление столба дугового разряда и торца вольфрамового электрода ниже поверхности основного свариваемого материала (рис. 1).

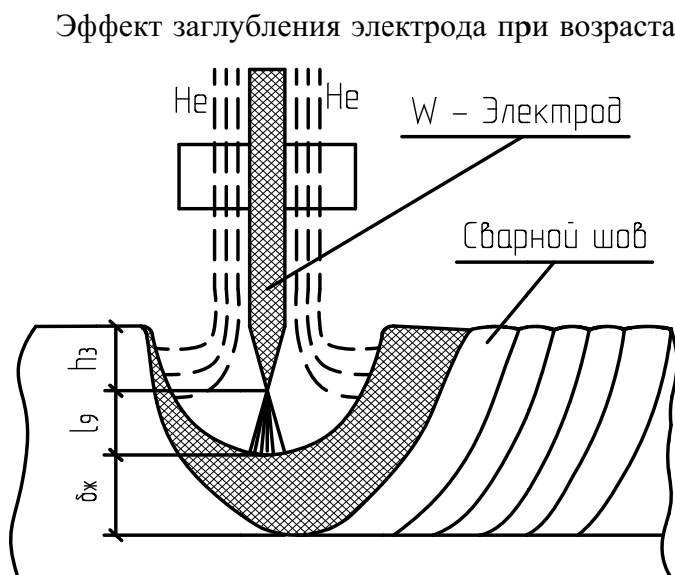


Рис. 1. Схема сварки погруженным электродом:
 h_3 – заглубление электрода; $\delta_{ж}$ – прослойка жидкого металла под электродом; l_9 – длина дуги;
 He – гелий

Эффект заглубления электрода при возрастании сварочного тока, теоретически обоснованный в работе [3], был заложен в конструкцию серийной установки СПВЭ марки ГСПД-1 (выпускаемой ОАО «Электромеханика», г. Ржев), в состав которой входит тиристорный выпрямитель ВСВ-2000. Между сварочным током $I_{св}$ и заглублением электрода h_3 существует взаимосвязь, которая обусловлена главным образом формой заточки вольфрамового электрода и, в гораздо меньшей степени, свойствами свариваемого материала, дугового напряжения и т.п., поэтому СПВЭ можно производить при обязательном принудительном регулировании (стабилизации) длины (напряжения) сварочной дуги.

Система автоматики установки ГСПД-1 позволяет осуществить стабилизацию длины сварочной дуги путем изменения силы сварочного тока при постоянном заглублении электрода. В этом случае длина дугового промежутка между электродом и металлом дна сварочной ванны поддерживается постоянной за счет уравнивания давления дуги действием гидростатического столба жидкого металла, вытесненного из-под электрода. При уменьшении длины дуги и дугового напряжения возникает необходимость увеличить давление и вытеснить часть расплавленного металла из-под электрода, т.е. увеличить силу сварочного тока. Естественно, что при увеличении длины дуги следует уменьшить силу тока. Тогда под действием гидростатического давления столба вытесненного жидкого



металла металл ванны поднимается к электроду до заданной длины дуги (дугового напряжения). При этом положение (углубление) электрода остается неизменным.

В табл. 1 представлены некоторые данные по влиянию плотности металла на гидростатический напор жидкометаллической ванны при СПВЭ [4].

Таблица 1

Влияние плотности материала на гидростатический напор жидкой ванны

Материал	Толщина материала, мм	Плотность, г/см ³	Гидростатический напор жидкой ванны, 10 ⁻¹ Па	Режим сварки		
				I _{св} , А	U _д , В	V _{св} , м/ч
ОТ4	4,0	4,5	1760	350	10	36
	5,0		2200	440	10	36
	10,0		4400	550	10,5	18
ЭИ961	4,0	7,8	3060	440	11	36
	8,0		6100	600	11	20
X18H10T	5,0	7,9	3870	480	11	36
ЭП199	10,0	8,64	8450	440	11	8,0

Для обеспечения практически постоянной глубины проплавления (вне зависимости от изменения объема расплавленного металла) необходимо сохранение постоянным заглубление электрода и напряжение дуги. К примеру, увеличение зазора между кромками уменьшает объем расплавленного металла. При этом гидростатическое давление столба жидкости на дугу уменьшается. Но в силу того, что давление дуги уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости, уменьшение длины (напряжения) дуги приводит к увеличению силы сварочного тока. Значение погонной энергии сварки будет оставаться неизменным.

Все представленные результаты были получены при сварке штатных конструкций из титановых сплавов BT20 или образцов-имитаторов. Более детально процесс СПВЭ представлен в монографии [2].

Углубление дугового разряда в свариваемый металл, при котором уменьшение излучения дуги, выделяемого дугой тепла, приводит к заметному увеличению эффективного КПД процесса нагрева металла и, как следствие, к увеличению глубины проплавления металла. Достижимая глубина проплавления складывается из трех составляющих (рис. 1): заглубление электрода h_3 , длины дуги l_9 и жидкометаллической прослойки $\delta_{ж}$.

Многочисленные исследования позволили установить, что при использовании вольфрамового электрода диаметром $\varnothing 10$ мм со стандартной заточкой рабочего торца на конус глубина проплавления не превышает 37...40 мм за один проход – этому соответствует заглубление электрода $h_3 = 23$ мм, сварочный ток порядка $I_{св} = 1750...1850$ А (рис. 2) и скорость сварки $V_{св} = 1,5$ мм/с.

Для дальнейшего увеличения глубины проплавления необходимо увеличивать заглубление электрода h_3 , однако это вызывает серьезную опасность короткого замыкания электрода на переднюю кромку ванны (замерзание электрода). Это явление является трудно исправимым браком и может привести к значительным материальным издержкам. Чтобы предотвратить замерзание электрода необходимо уменьшать скорость сварки, что также нежелательно, так как приведет к нежелательному возрастанию интенсивности теплового режима сварки. Можно увеличить глубину проплавления, если вместо цельнометаллической вставки использовать гранулированную присадку [5], что усложняет технологический процесс.

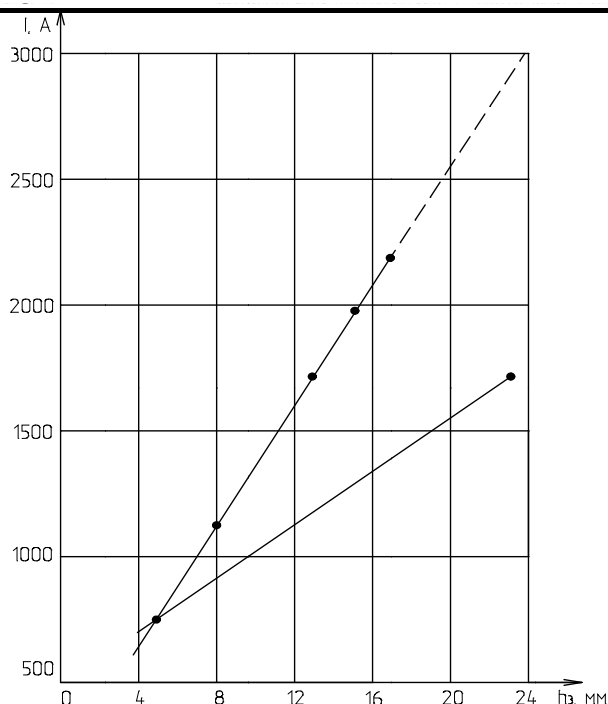


Рис. 2. Зависимость сварочного тока от заглубления электрода:

- 1 – сварка тороидальным электродом;
- 2 – сварка стандартным электродом

увеличению глубины проплавления, поэтому при одинаковых уровнях заглубления h_3 тороидальному электроду соответствует больший сварочный ток (рис. 2). Это положение подтверждает также график, приведенный на рис. 3.

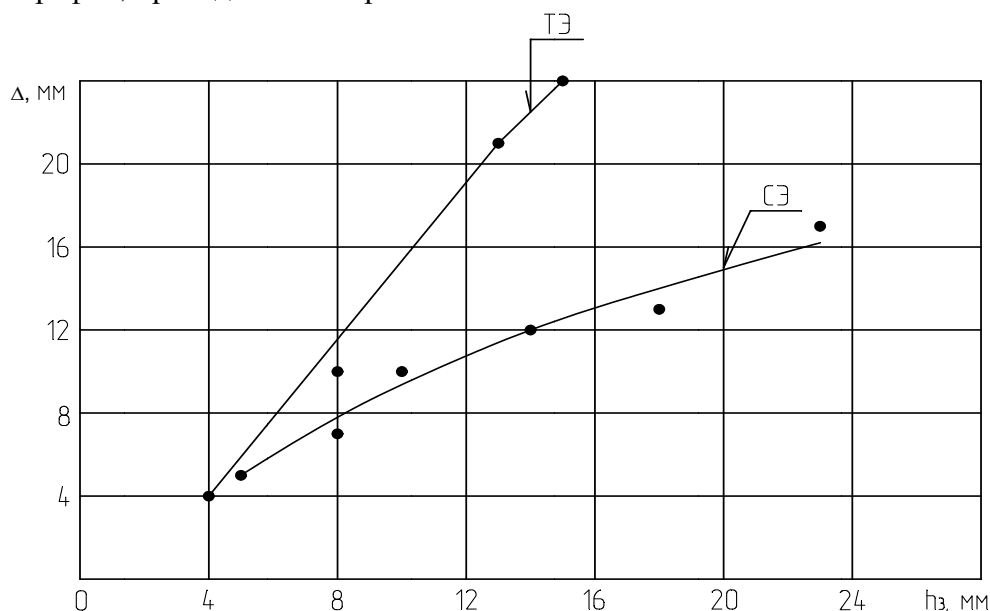


Рис. 3. Зависимость показателя Δ от уровня заглубления электрода h_3 при СПВЭ: СЭ – стандартным; ТЭ – тороидальным

Показатель Δ представляет собой толщину жидкометаллической прослойки под электродом:

$$\Delta = H - h_3.$$

С положительной стороны зарекомендовал себя электрод, рабочий торец которого выполнен в форме полутора – тороидальный электрод [6].

Ранее было показано, что тороидальный электрод обладает повышенной эрозионной стойкостью в условиях сварки на экстремально высоких токах и возбуждает полоцилиндрическую дугу, обладающую эффектом самофокусирования [7]. Этот эффект положительно сказывается на давлении дуги. Как известно, с ростом сварочного тока идет увеличение давления дуги на жидкий металл. Как известно, силовое воздействие дуги P пропорционально квадрату силы сварочного тока $I_{св}$:

$$P = kI_{св}^2,$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от длины дуги, состава защитной среды и ряда других факторов.

Под действием силы Ампера происходит сжатие полоцилиндрической дуги, что способствует увеличению давления дуги на жидкий металл и в конечном итоге

Как следует из приведенного графика, при сварке тороидальным электродом значительно облегчается процесс теплопередачи от дуги к поверхности свариваемой детали, то есть к тому месту, которое является наиболее опасным в смысле замерзания электрода, поэтому можно считать, что тороидальный электрод обладает еще значительным потенциальным ресурсом и может обеспечивать глубину проплавления до 55...60 мм за один проход при повышении сварочного тока до 2500 А и более.

Увеличение толщины деталей под сварку до 60...65 мм с возможностью подхода только с одной стороны и до 100...110 мм при двусторонней сварке с использованием источника питания ВСВ-2500 выдвигает задачу разработки такой технологии СПВЭ, которая более полно учитывает возможности приемов и способов СПВЭ.

Наиболее перспективной в данном направлении представляется комбинированная подготовка свариваемых кромок, которая сочетает П-образный вырез и наличие щели. На рис. 4 представлена схема подготовки кромок для двусторонней СПВЭ. Процесс осуществляется следующим образом: заполняют гранулированной присадкой щелевую разделку; сварку осуществляют тороидальным электродом, для обеспечения максимальной концентрации энергии дуги и глубины проплавления.

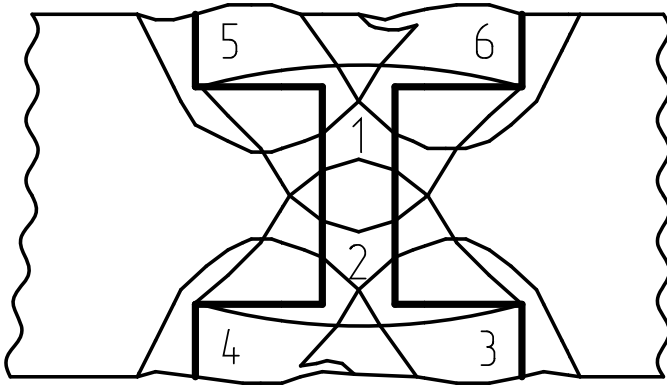


Рис. 4. Схема многопроходной сварки

После заварки осевой части стыка, П-образный вырез заполняют гранулированной присадкой. Размеры конструктивных элементов выреза зависят от параметров режима сварки; они уточняются в ходе предварительных экспериментов.

Сварку П-образного выреза выполняют в два прохода рассредоточенной дугой. Электрод устанавливают со смещением относительно оси стыка сначала с одной стороны, а потом с другой.

Так как прочностные характеристики металла сварного шва зависят от его химического состава, был проведен расчет долевого соотношения основного и присадочного металлов в формировании шва на сплаве ВТ20.

Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Доля основного и присадочного металла в шве

Номер прохода	Долевое соотношение	
	ВТ20	Присадка
1, 2	0,783	0,217
3, 5	0,524	0,476
4, 6	0,579	0,421

На основании данных табл. 2 было определено среднее содержание легирующих элементов в сварном шве для двух случаев (табл. 3).

Таблица 3

Содержание легирующих элементов

Материал	Al	V	Mo	Zr
Сплав ВТ20	5,5-7,0	0,8-2,5	0,5-2,0	1,5-2,5
Проход 4 с ВТ1-0	3,85-4,9	0,56-1,75	0,35-1,40	1,05-1,75

Проход 4 с СПТ-2	4,9-6,2	1,75-2,45	0,3-1,9	1,3-2,6
------------------	---------	-----------	---------	---------

В первом случае в качестве присадки была использована проволока из чистого титана марки ВТ1-0, во втором – присадочная проволока марки СПТ-2.

Полученные расчетным путем данные можно считать удовлетворительными. Прогнозируемый химический состав сварного шва должен обеспечить его механические свойства на уровне 90 % от сплава ВТ20.

Проведенные исследования показали, что использование тороидального электрода и источника питания сварочного тока типа ВСВ-2500 делает возможным сварку титановых конструкций толщиной до 60 мм за один проход и толщиной до 130 мм при комбинированной многопроходной СПВЭ по щелевому зазору, заполненному гранулированной присадкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние способа сварки на механические свойства сварных швов / Б. И. Долотов, А. А. Дашковский, В. И. Муравьев, В. П. Зайцев // *Авиационная промышленность*. – 1992. – № 8. – С. 46-47.
2. Долотов, Б. И. Сварка погруженным вольфрамовым электродом / Б. И. Долотов. – М.: *Машиностроение-1*, 2004. – 208 с.
3. Дубашинский, В. М. К вопросу о погружении дуги в сварочную ванну при автоматической сварке вольфрамовым электродом в среде инертных газов / В. М. Дубашинский // *Сварка: сб. ст.* – Л.: *Судостроение*, 1964. – № 7.– С. 81-90.
4. Особенности сварки погруженной дугой неплавящимся электродом нержавеющей сталей и сплавов / В. И. Матюхин, В. И. Коваль, В. И. Шаталов [и др.] // *Сварочное производство*. – 1974. – № 9. – С. 24-26.
5. Автоматическая сварка погруженным электродом с использованием присадочного материала из рубленой проволоки / Б. И. Долотов, А. А. Дашковский, Н. Б. Фейгенсон // *Авиационная промышленность*. – 1968. – №8. – С. 44.
6. Долотов, Б. И. Вольфрамовые электроды повышенной стойкости / Б. И. Долотов, В. И. Муравьев, Б. Н. Марьин [и др.] // *Сварочное производство*. – 1996. – № 10. – С. 23-26.
7. Долотов, Б. И. Электромагнитные силы сжатия дуги, возбуждаемой на тороидальном электроде и электроде с двумя вершинами / Б. И. Долотов, Н. А. Калугина // *Сварочное производство*. – 1997. – № 5. – С. 5-8.