



ВЛИЯНИЕ ГАЛОГЕНИДНЫХ ФЛЮСОВ НА ПОРИСТОСТЬ ШВОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛС

В. Н. ЗАМКОВ, д-р техн. наук, **Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ**, инж., **В. Ф. ТОПОЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук, **И. К. ПЕТРИЧЕНКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Применение галогенидного флюса при ЭЛС титанового сплава позволяет на порядок снизить пористость в металле швов.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, титановый сплав, галогенидный флюс, металлографические методы, пористость

Поры — характерный дефект швов, выполненных сваркой плавлением, на титановых сплавах. Изучению причин их возникновения посвящено большое количество работ, однако результаты исследований противоречивы. Установлено [1], что газовые пузырьки в сварочной ванне зарождаются, как правило, на торцах свариваемых кромок, а плотность сварных швов главным образом зависит от условий их движения в расплавленном титане. Это позволяет считать, что поры представляют собой пузырьки нерастворимых в расплавленном титане газов, не успевшие выделиться из сварочной ванны до ее затвердевания. При прочих равных условиях наиболее склонны к образованию пор швы, выполненные электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) [2]. Это, как правило, поры размером от 0,01 до 0,2 мм [3], обнаружить которые удается лишь металлографическими методами. Установлено, что количество и средний размер этих пор уменьшаются с понижением содержания водорода в основном металле. Однако даже при минимальной концентрации водорода в металле (0,001 мас. %), тщательной подготовке кромок и оптимальных режимах сварки они присутствуют в швах, выполненных ЭЛС. Поэтому можно предположить, что повышенная склонность последних к возникновению пор обусловлена кратковременностью существования металла в расплавленном состоянии и высокой скоростью кристаллизации. Определенную роль в образовании пор при ЭЛС может играть нестабильность парогазового канала и особенности локального взаимодействия электронного пучка с металлом, как это имеет место при лазерной сварке [4].

Наиболее действенным методом борьбы с пористостью в швах при дуговой сварке титана яв-

ляется применение галогенидных флюсов [5, 6]. Их положительное влияние на плотность швов обусловлено тем [6], что расплавленный флюс очищает кромки, разлагая влагу, адсорбированную на их торцах и поверхности, а в самой сварочной ванне интенсифицирует удаление пузырьков. В то же время флюс снижает вероятность появления газовых пузырьков в жидком металле [5]. Учитывая это, целесообразно определить возможность и эффективность применения галогенидных флюсов при ЭЛС для уменьшения пористости в титановых швах.

Для исследований использовали пластины из сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) размером 300×100×12,5 мм, полученные прокаткой поковки из слитка вакуумно-дуговой плавки (ВДП) и слитка электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). После прокатки пластины подвергали отжигу при температуре 700 °С в течение 1 ч для снятия напряжений. Химический состав и механические свойства основного металла приведены в табл. 1. Различие механических свойств металла ВДП и ЭЛПЕ в данном случае обусловлено разным содержанием в нем алюминия и кислорода, а также разной степенью деформации при прокатке.

Сварку образцов выполняли электронно-лучевым способом в установке УЛ-144, оснащенной энергоблоком ЭЛА 60/60. Для совмещения электронного луча со стыком использовали прибор СУ 220. Имитацию вывода кратера осуществляли, дискретно уменьшая сварочный ток (от номинального значения до нуля) в определенных точках, расположенных на отрезке шва заданной длины путем программируемого управления источником питания. Пористость швов оценивали по результатам рентгенопросвечивания сварных соединений и данным металлографического анализа продольных микрошлифов в трех характерных участках

Таблица 1. Химический состав и механические свойства титанового сплава ВТ-6

Метод плавки сплава	Массовая доля легирующих элементов и газов, %					Механические свойства сплава*				
	Al	V	[N]	[O]	[H]	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV , ₂ Дж/см ²
ВДП	5,5	4,0	0,020	0,08	0,0024	950	830	12	27	43
ЭЛПЕ	6,0	3,9	0,010	0,15	0,0018	1004	970	13	30	36

* Средние значения по результатам испытания пяти образцов.

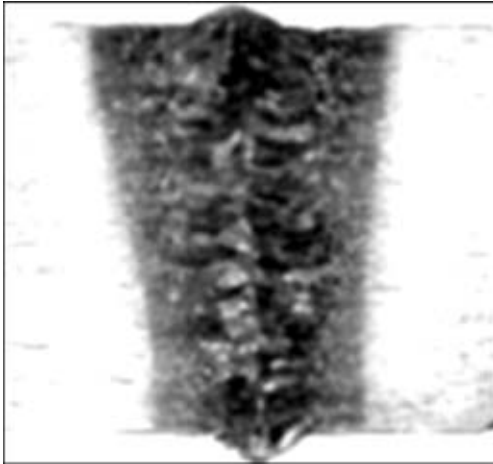


Рис. 1. Макроструктура сварного соединения сплава BT6, выполненного ЭЛС на оптимальном режиме, X3

шва — по зоне сплавления, оси шва и посередине между ними. Для сравнительной количественной оценки пористости швов использовали методику, предложенную в работе [3]. При сварке применяли флюс марки АНТ-23А (ТУУ 05416923.002–95).

При выборе режима сварки ($U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{св}} = 90$ мкА, частота сканирования 170 Гц, диаметр развертки 4 мм, $v_{\text{св}} = 25$ м/ч) исходили из необходимости обеспечить удовлетворительное формирование лицевой стороны и корня шва и отсутствие в нем дефектов по данным рентгенопросвечивания (рис. 1). Оптимальное формирование шва на участке вывода кратера получено при ступенчатом (20 ступеней) снижении сварочного тока от 90 мкА до нуля в течение 10 с, т. е. на участке длиной 70 мм.

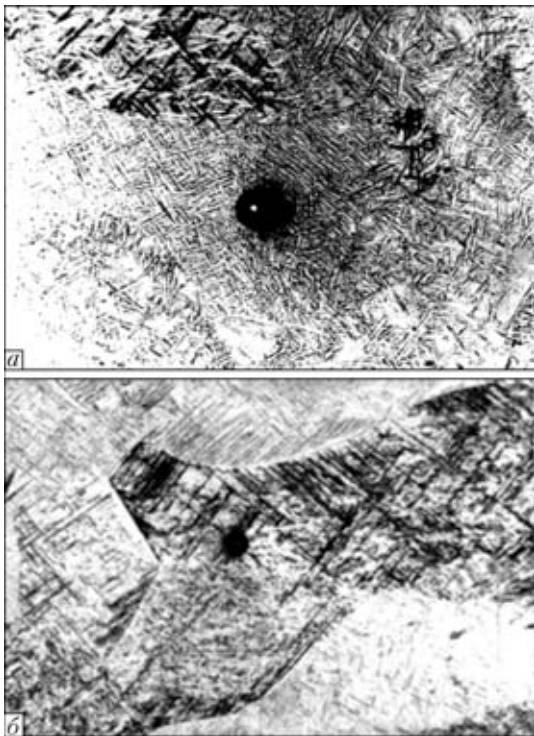


Рис. 2. Микропоры в сварных швах, выполненных ЭЛС: а — зона сплавления, металл ВДП, X200; б — вблизи оси шва, металл ЭЛПЕ, X100

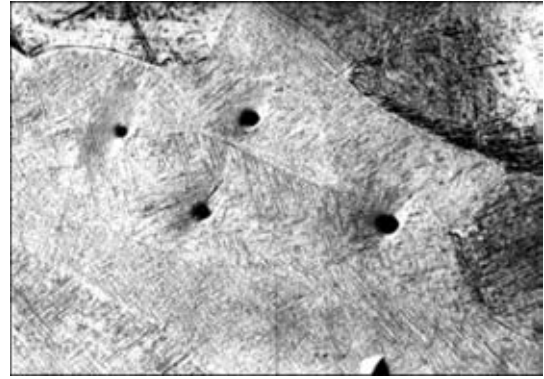


Рис. 3. Группа микропор в электронно-лучевом металле шва (основной металл ЭЛПЕ), X200

Первые опыты по ЭЛС с применением флюса выполняли по той же технологии, что и при дуговой сварке, т. е. флюс наносили в виде спиртовой суспензии на поверхность уже подготовленного к сварке стыка в количестве около 13 мг/см². Визуальный осмотр выполненных таким образом сварных соединений показал неудовлетворительное формирование швов, а рентгенопросвечивание зафиксировало значительное количество внутренних дефектов различного размера. По результатам металлографического анализа они представляли собой полости, внутри которых в ряде случаев наблюдались частицы шлака. Когда же флюс перед сваркой наносили только на торцы кромок, то количество дефектов резко уменьшалось. Если при этом количество

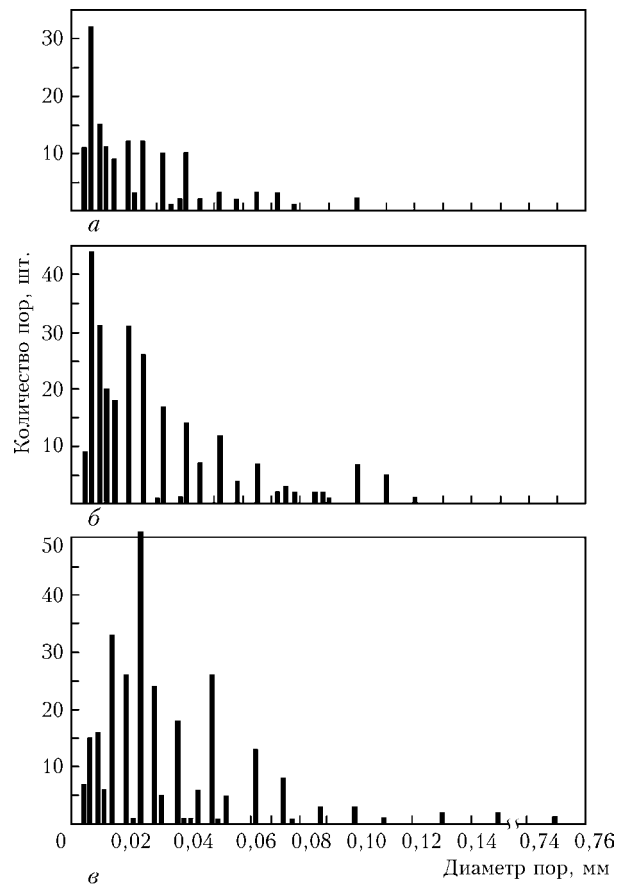


Рис. 4. Гистограммы распределения пор в швах, выполненных ЭЛС (длина шва 250 мм) на металле ЭЛПЕ: а — зона сплавления; б — между зоной сплавления и осью шва; в — по оси шва

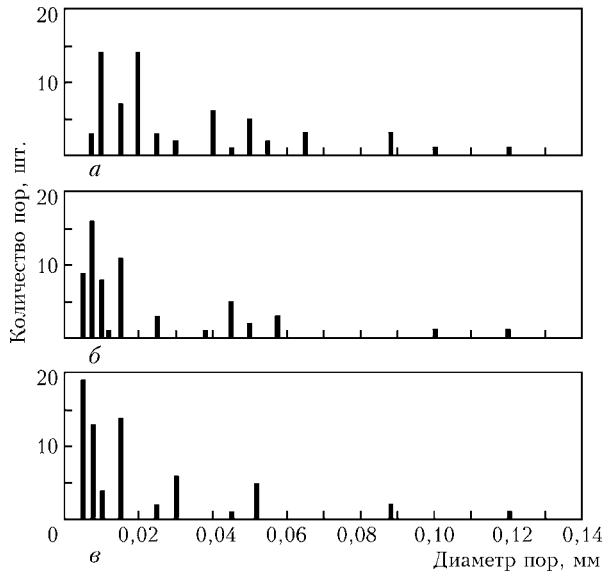


Рис. 5. Гистограммы распределения пор в швах, выполненных ЭЛС с применением флюса АНТ-23А (длина шва 270 мм): а-в — то же, что и на рис. 4

флюса составляло около 3 мг/см^2 , то методом рентгенопросвечивания дефекты в швах вообще не обнаруживали. Эксперименты показали, что независимо от способа выплавки сплава флюс в оптимальном количестве (около 3 мг/см^2) не оказывает влияния на формирование швов и стабильность процесса сварки. Это подтвердило результаты предварительных исследований, согласно которым флюс при ЭЛС может влиять лишь на металлургические процессы в сварочной ванне и никак не сказывается на пространственно-энергетические характеристики электронного пучка.

Для дальнейших исследований на выбранном режиме сварки (без флюса и с флюсом) выполнены сварные образцы, включая участки вывода кратера. Рентгеновский контроль не выявил в них каких-либо дефектов, однако при металлографических исследованиях в металле швов обнаружены мелкие поры. Встречаются единичные микропоры (рис. 2), иногда наблюдаются группы пор (рис. 3).

Для обобщения результатов металлографических исследований продольных сечений швов строили гистограммы распределения пор по их раз-

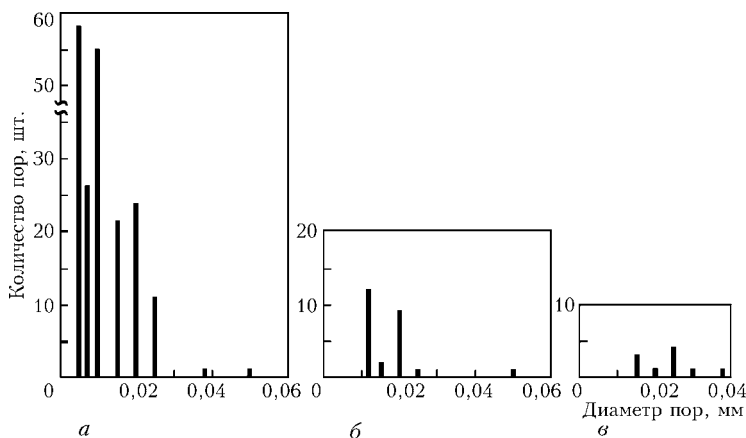


Рис. 6. Гистограммы распределения пор в металле шва длиной 60 мм (на участке вывода кратера), выполненном ЭЛС с применением флюса: а-в — то же, что и на рис. 4

Таблица 2. Влияние способа сварки на содержание примесей в металле шва

Метод плавки сплава	Способ сварки	Содержание примесей в шве, мас. %		
		C	[O]	[H]
ВДП	ЭЛС	0,018	0,076	0,0021
	ЭЛС с флюсом	0,019	0,079	0,0020
ЭЛПЕ	ЭЛС	0,011	0,160	0,0017
	ЭЛС с флюсом	0,011	0,160	0,0016

мерам (рис. 4). Анализ гистограмм показал, что во всех исследованных сечениях преобладают поры, размер которых не превышает 0,06 мм. С увеличением диаметра микропор их количество уменьшается. В сварных соединениях металла ЭЛПЕ поры наблюдали преимущественно в центральной части швов, где больше их количество и размеры (см. рис. 4, а-в). Максимальная пористость в швах металла ВДП имела место в зоне сплавления при таком же общем уровне пористости. В то же время полученные данные не позволяют сделать однозначный вывод о каком-либо влиянии способа выплавки металла на характер распределения пор в швах.

Для сравнительной количественной оценки пористости использовали выражение [3]

$$\alpha = \frac{\pi(R_1^2 n_1 + R_2^2 n_2 + \dots + R_i^2 n_i) 100}{S},$$

где R_1, R_2, \dots, R_i — радиусы пор; n_1, n_2, \dots, n_i — количество пор данного радиуса; S — площадь поверхности исследуемого образца.

В начале определяли пористость металла шва по всей длине шва, т. е. процентное отношение площади, занятой порами, к площади поверхности исследуемого образца ($\alpha_{ср1}, \alpha_{ср2}, \alpha_{ср3}$), а затем среднюю пористость шва или участка вывода кратера. Установлено, что усредненная пористость в сечении однопроходного шва, выполненного ЭЛС на сплаве ВТ6, составляет 0,012 %, а в участке вывода кратера — от 0,025 до 0,055 %, т. е. дефектность этого участка была значительно больше.

Как отмечалось ранее, применение флюса АНТ-23А при ЭЛС никак не повлияло на стабильность процесса сварки и формирование швов. Однако наличие флюса в зоне сварки привело к существенному уменьшению, фактически на порядок, количества пор в швах (рис. 5), в том числе на участке вывода кратера (рис. 6). Значительно уменьшились и размеры пор. Усредненная пористость в сечении однопроходного шва и в участке вывода кратера при сварке с флюсом составила 0,0017 %.

В швах, выполненных ЭЛС и ЭЛС с применением флюса, содержание таких примесей, как углерод, кислород, водород (которые могут быть причиной возникновения пор) [3, 7], практически одинаково (табл. 2). И хотя содержание водорода в швах несколько меньше, чем

в основном металле (табл. 1, 2), это типично для титановых швов, выполненных сваркой плавлением [5]. Поэтому влияние флюса на пористость швов не связано с преимущественным удалением, например, водорода из сварочной ванны. Сравнив концентрацию кислорода и углерода в основном металле и металле швов (табл. 1, 2), можно утверждать, что при ЭЛС образование пузырьков СО в результате взаимодействия углерода и кислорода в сварочной ванне [6] вообще не имеет места. Существенное уменьшение пористости в сварных швах, выполненных с использованием галогенидного флюса, вероятнее всего, является следствием более интенсивного удаления пузырьков из жидкого титана.

Выводы

1. В швах титанового сплава ВТ6, выполненных ЭЛС, наблюдается большое количество мелких пор, диаметр которых не превышает 0,2 мм. Возникновение пористости не связано с методом выплавки сплава.

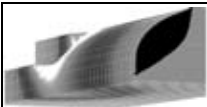
2. Для уменьшения пористости сварных швов при ЭЛС титана рекомендуется использовать га-

Application of halogenide flux in EBW of titanium alloys allows reducing porosity in the weld metal by an order of magnitude.

логенидный флюс. Установлено, что применение флюса марки АНТ-23А не влияет на формирование швов и стабильность процесса сварки. Количество пор при этом уменьшается на порядок.

1. *Муравьев И. И., Холошин А. Л.* Влияние режимов сварки на пористость металла шва некоторых титановых сплавов // Свароч. пр-во. — 1979. — № 6. — С. 18–19.
2. *Плотность* металла швов на техническом титане ВТ1-0, выполненных различными способами сварки // Т. В. Голуб, О. Н. Кашевская, В. Н. Замков и др. // Автомат. сварка. — 1990. — № 11. — С. 31–33.
3. *Замков В. Н., Шевелев А. Д.* Образование пор в сварных соединениях титанового сплава ВТ6, выполненных ЭЛС // Там же. — 1979. — № 12. — С. 50–54, 57.
4. *Katayama S., Mizutani M.* Elucidation of laser welding phenomena and porosity formation mechanism // Trans. JWRI. — 2003. — 32, № 1. — P. 67–69.
5. *Замков В. Н., Цейгер Е. Н.* Влияние фторидных флюсов на пористость швов при сварке титана в аргоне неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1983. — № 4. — С. 34–38.
6. *Редчиц В. В., Никифоров Г. Д., Вакс М. А.* Предупреждение пор в сварных швах тонколистового титана и его сплавов // Свароч. пр-во. — 1974. — № 4. — С. 7–10.
7. *Петров Г. Л., Хатунцев А. Н.* Роль химических реакций в образовании пор при сварке титановых сплавов // Там же. — 1975. — № 8. — С. 57–58.

Поступила в редакцию 06.04.2004



5-я Всероссийская виртуальная конференция «Компьютерные технологии в соединении материалов – 2004»

Международный центр «Компьютерные высокие технологии в соединении материалов» Тульского государственного университета организует 5-ю Всероссийскую конференцию «Компьютерные технологии в соединении материалов – 2004», которая является Первой международной электронной конференцией. Проведение конференции приурочено к десятилетию успешной работы центра, которая состоится 14 апреля 2005 г. Создание центра совпало с периодом бурного развития компьютерной техники и математического моделирования, позволившим выявить многие пробелы в теоретических и практических знаниях и частично устранить их. Этой актуальной проблеме и посвящена виртуальная конференция, информацию о которой можно найти на сайте comhigh-tech.tsu.tula.ru/weldsim. Труды конференции будут изданы к юбилею центра в апреле 2005 г. Для международного вычислительного сварочного сообщества все статьи, включенные в труды конференции, будут свободно доступны через Интернет в декабре 2004 г.

Материалы для участия в конференции просьба направлять в адрес Оргкомитета до 30 ноября 2004 г.

Вице-председатель Оргкомитета,
Директор Центра «ComHighTech в соединении материалов»
проф. Судник В. А.

Тел./факс: (0872) 33-17-85
Тел.: 33-12-58

E-mail: sudnik@oitsp.tsu.tula.ru / weldsim

Кафедра оборудования и технологии сварочного и литейного производства
Тульского государственного университета
300600, г. Тула, просп. Ленина, 92