



СВОЙСТВА И СТРУКТУРА КОЛЬЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ, ПОЛУЧЕННЫХ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

Е. Г. ТЕРНОВОЙ, В. Ф. ШУЛЫМ, А. Р. БУЛАЦЕВ, Т. Г. СОЛОМИЙЧУК, инженеры,
В. А. КОСТИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены исследования свойств и структуры металла кольцевых соединений труб из стали 304SS, титанового сплава ПТ-3В и сплава монель, полученных способом орбитальной электронно-лучевой сваркой в вакууме. Выполненные исследования ориентированы на применение оборудования и технологии орбитальной электронно-лучевой сварки для ремонта трубопроводов, расположенных снаружи функционирующих космических объектов.

Ключевые слова: трубопроводы, неповоротные стыки, орбитальная электронно-лучевая сварка, соединения, сталь 304SS, титановый сплав ПТ-3В, сплав монель, механические свойства, макро- и микроструктуры, микротвердость, химическая неоднородность

При выполнении ремонтных работ на борту международной космической станции (МКС) в условиях космоса актуальной является проблема сварки неповоротных стыков трубопроводов различного назначения. Анализ эксплуатации космических объектов, длительное время функционирующих в условиях орбитального полета, в частности, российского орбитального комплекса «Мир», свидетельствует о том, что одними из наиболее уязвимых узлов являются технологические трубопроводы, которые в процессе длительной эксплуатации по различным причинам (механические повреждения, воздействие метеоритных частиц, коррозия и др.) могут приходиться в негодность и требовать ремонта в условиях космоса [1–4]. Одна часть трубопроводов находится внутри функционируемых модулей, другая расположена за бортом станции и эксплуатируется в условиях космического вакуума и отрицательных температур. Предполагается, что через 6...10 лет с начала эксплуатации МКС может возникнуть необходимость в их ремонте и соответственно в способах и устройствах для его реализации.

Многолетние исследования, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, показали, что наиболее приемлемыми способами для ремонта трубопроводов, расположенных внутри космического модуля, является способ сварки ТИГ в специализированных накидных камерах с контролируемой атмосферой [5–8], а вне станции — электронно-лучевая сварка (ЭЛС) [3, 4, 8].

Сваркой ТИГ обычно сваривают стыковые соединения с подачей присадочного материала или по отбортовке кромок. Без присадочного мате-

риала сваривают нахлесточные соединения, а также стыковые кольцевые соединения труб многопроходным способом автопрессовки, прочность которых не ниже соединений, сваренных с подачей присадочной проволоки, которая соответствует составу основного металла [9–13].

При ЭЛС стыковых кольцевых соединений за один проход (без отбортовки кромок) на лицевой части шва образуется занижение, существенно снижающее механические свойства соединений. В связи с этим представляет интерес получение качественного стыкового соединения труб способом ЭЛС без подачи присадочного материала с усилением корневой и верхней части валика шва.

В настоящей работе приведены результаты исследований свойств и структуры соединений труб, полученных при отработке технологии одно- и двухпроходной орбитальной ЭЛС без введения присадочных материалов, с целью получения вакуумплотных, прочных и качественно сформированных сварных соединений для решения проблемы ремонта трубопроводов в открытом космосе.

В процессе проведения экспериментов использовали лабораторный энергокомплекс с электронно-лучевым нагревателем, который вращался вокруг неповоротной трубки (рис. 1). Сварку образцов выполняли встык одним и двумя проходами, без введения присадочных материалов. В качестве образцов использовали трубки диаметром 12,8 мм и толщиной стенки 1,0 мм из нержавеющей стали 304SS, титанового сплава ПТ-3В и никелевого сплава НМЖМц (монель). При этом определяли оптимальные режимы орбитальной ЭЛС, свойства и структурные особенности полученных сварных соединений труб.

Качество полученных соединений оценивали: внешним осмотром; проверкой вакуумной плотности соединений на гелиевом течеискателе ТИ-1-14; механическими испытаниями на разрыв

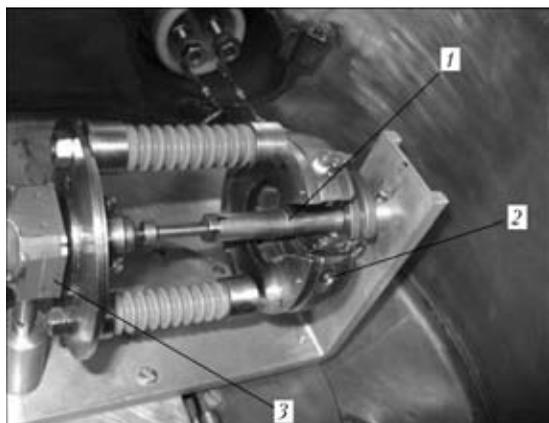


Рис. 1. Опытный образец электронно-лучевого нагревателя для орбитальной ЭЛС стыковых соединений труб: 1 — свариваемый образец; 2 — кольцевой электронно-лучевой нагреватель; 3 — привод орбитального вращения

соединений труб на машине ЦДМ-10 при температуре +20 °С и на машине ИМР при температуре -196 °С; испытаниями на пластичность способом сплющивания согласно ГОСТ 8695-75 на машине ЦДМ-10; исследованиями макро- и микрошлифов соединений. Химический состав основного металла и металла швов определяли спектральным анализом с использованием фотоэлектрического спектрометра ДФС-36.

Металлографические исследования геометрии и структуры металла как всего соединения, так и его отдельных участков выполняли оптическим микроскопом «Neophot-32». Микротвердость соединений HV 1,0 МПа измеряли на продольных срезах трубок на микротвердомере М-400 фирмы «LECO» с шагом 200 мкм. Структурные составляющие стали 304SS выявляли электрохимическим травлением в 20 % водном растворе хромовой кислоты при напряжении 10 В в течение 5 с, а составляющие титанового сплава ПТ-3В — химическим травлением в реактиве следующего состава: 1 объемная часть HF, 3 объемные части HNO₃, 6 объемных частей H₂O. Структуру сплава монель выявляли электрохимическим травлением в 20 % водном растворе сернокислого аммония при напряжении 20 В в течение 5 с. Количество δ-феррита в металле шва и основном металле сварных соединений определяли ферритометром Ferrit Gehalt-messer-1.053. Химическую неоднородность основ-

Таблица 1. Режимы сварки стыковых кольцевых соединений для орбитальной ЭЛС труб диаметром 12,8×1,0 мм

№ п/п	Материал	$I_{пуч}$, МА	U , кВ	$v_{ср}$, М/Ч	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с
1	304SS	35,0	9,2	22	0,5	14,0	3,0
2	ПТ-3В	32,5	9,5	36	1,5	8,0	3,5
3	Монель	35,0	9,2	15	1,0	16,0	3,0

Примечание. t_1 — время выхода на рабочий режим; t_2 — время сварки на рабочем режиме; t_3 — вывод кратера.

ного металла и металла швов изучали на микроанализаторе SX-50 фирмы «Самеса».

В результате проведенных экспериментов определяли режимы орбитальной ЭЛС кольцевых соединений труб из стали 304SS, титанового сплава ПТ-3В и сплава монель при мощности пучка до 400 Вт. Ускоряющее напряжение, ток пучка, скорость сварки и промежутки времени сварочного цикла выбирали в зависимости от материала трубки. При этом ускоряющее напряжение, ток пучка и скорость сварки идентичны как для однопроводной, так и для сварки за два прохода. Значения режимов сварки приведены в табл. 1.

Анализ макрошлифов соединений труб из стали 304SS, сплава ПТ-3В и сплава монель (рис. 2) показал, что путем выбора режимов сварки можно достичь оптимальной геометрии и удовлетворительного формирования верхнего и корневого валиков усиления без введения присадочных материалов. Проверка на вакуумную плотность сварных соединений не выявила нарушения герметичности швов, полученных с различным количеством проходов.

Следует также отметить, что химический состав металла швов соединений из указанных материалов не отличается от исходного состава основного металла (табл. 2) и не зависит от количества проходов.

Полученные результаты испытаний соединений труб на разрыв (табл. 3) из стали 304SS при температурах испытаний +20 °С и сваренных за один проход показали $0,74...0,77\sigma_{в}^{0,М}$, а образцы, полученные за два прохода, — $0,95\sigma_{в}^{0,М}$. При температурах испытаний -196 °С эти показатели возросли как для основного металла, так и для свар-



Рис. 2. Макрошлифы (×20) сварных стыковых соединений, полученных орбитальной ЭЛС за два прохода: а — сталь 304SS; б — титановый сплав ПТ-3В; в — сплав монель



Таблица 2. Химический состав (мас. %) и значения временного сопротивления разрыву исследуемых сплавов

Материал	C	Mn	Cr	Ni	Si	P	Cu	Fe	Al	V	Mo	Zr	Ti	$\sigma_{B, \text{МПа}}$
304SS	0,20	2,0	18...20	8,0...10,5	1,0	0,045	—	Основа	—	—	—	—	—	800
ПТ-3В	—	0,04	≤0,1	—	0,07	—	—	0,5	3,6	2,4	≤0,3	0,05	Основа	810
Монель	—	1,2	—	Основа	<0,2	—	30,5	2,0	—	—	—	—	—	680

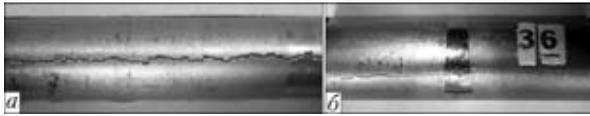


Рис. 3. Образцы сварных соединений труб из титанового сплава ПТ-3В после испытаний на сплющивание: а — основной металл; б — орбитальная сварка за два прохода

ных соединений на 10...15 % по сравнению со значениями, полученными при температуре +20 °С. Показатели прочности соединений из сплава монель аналогичны показателям соединений из стали 304SS. Для титанового сплава ПТ-3В испытания на разрыв выполняли только при температуре +20 °С. Проанализировав результаты проведенных испытаний, можно отметить, что наиболее высокие показатели прочности наблюдались в соединениях с двумя проходами, которые не имели занижений верхнего валика шва.

В ходе испытаний на пластичность сплющиванием сварных соединений и основного металла на образцах из стали 304SS и сплава монель трещины не выявлены, а на образцах из титанового сплава ПТ-3В обнаружены продольные трещины на трубках основного металла и на сварных соединениях (рис. 3).

Разрушение образцов основного металла сплава ПТ-3В (в виде трещин с двух сторон) произошло по всей длине его образующей. На сварных образцах трещины появились также с двух сторон по торцам и остановились на границе основного металла и ЗТВ. Шов и ЗТВ по обеим сторонам от шва оказались настолько пластичными, что

сработали как гасители трещин (рис. 3, б). Это можно объяснить тем, что ЗТВ при сварке этим способом более пластичная по сравнению с основным металлом трубки, который не был подвержен термическому влиянию.

Исследования полированных шлифов соединений из стали 304SS, титанового сплава ПТ-3В и монель показали, что в основном металле стали 304SS и сплава монель выявлены такие неметаллические включения, как оксиды, сульфиды, силикаты и др., в титановом сплаве ПТ-3В неметаллические включения практически не наблюдались.

Микроструктура основного металла и металла швов из стали 304SS (рис. 4, а-в) преимущественно аустенитная с небольшим количеством δ-феррита. Основной металл титанового сплава ПТ-3В (рис. 4, е) состоит из зерен α-фазы, вытянутых вдоль текстуры проката, а металла шва и ЗТВ — из зерен α'-фазы (рис. 4, з, д). На микроструктурах соединений из сплава ПТ-3В отсутствует четкая граница линии сплавления (рис. 4, д). Это способствует улучшению пластичности участка ЗТВ и приостанавливает распространение трещин из основного металла в ЗТВ и шов (рис. 3, б). Наблюдается также ярко выраженная граница ЗТВ и основного металла (рис. 4, е). Микроструктура основного металла и металла шва соединений из сплава монель подобна микроструктуре чистого никеля [14] и имеет однофазный состав твердого раствора на основе никеля (рис. 4, ж, и). Небольшие добавки железа и кремния так же, как и меди, но в большем количестве, находятся в растворе и самостоятельных фаз не образуют.

При исследовании макро- и микроструктур сварных соединений из сплава монель, полученных орбитальной ЭЛС за один проход, в металле швов обнаружена крупная и мелкая пористость (рис. 5). Кроме того, наблюдаются овальные полости, заполненные металлом, с закристаллизовавшейся субмикроструктурой (по стрелке). В швах, полученных за два прохода, таких дефектов не обнаружено.

Образование пор и полостей в соединениях из сплава монель можно объяснить склонностью никеля и его сплавов к образованию пористости при сварке [15], а также

Таблица 3. Значения временного сопротивления разрыву кольцевых соединений труб, полученных орбитальной ЭЛС

Исследуемый участок	Материал	Количество проходов	$\sigma_{B, \text{МПа}}$, при T, °С		Место разрушения
			+20	-196	
Основной металл	304SS	—	798	923	ОМ
Сварной стык		1	620	812	МШ
	2	760	915	ЗТВ	
Основной металл	ПТ-3В	—	800	—	ОМ
Сварной стык		1	460	—	МШ
	2	712	—	ЗТВ	
Основной металл	Монель	—	670	780	ОМ
Сварной стык		1	560	680	МШ
	2	630	740	ЗС	

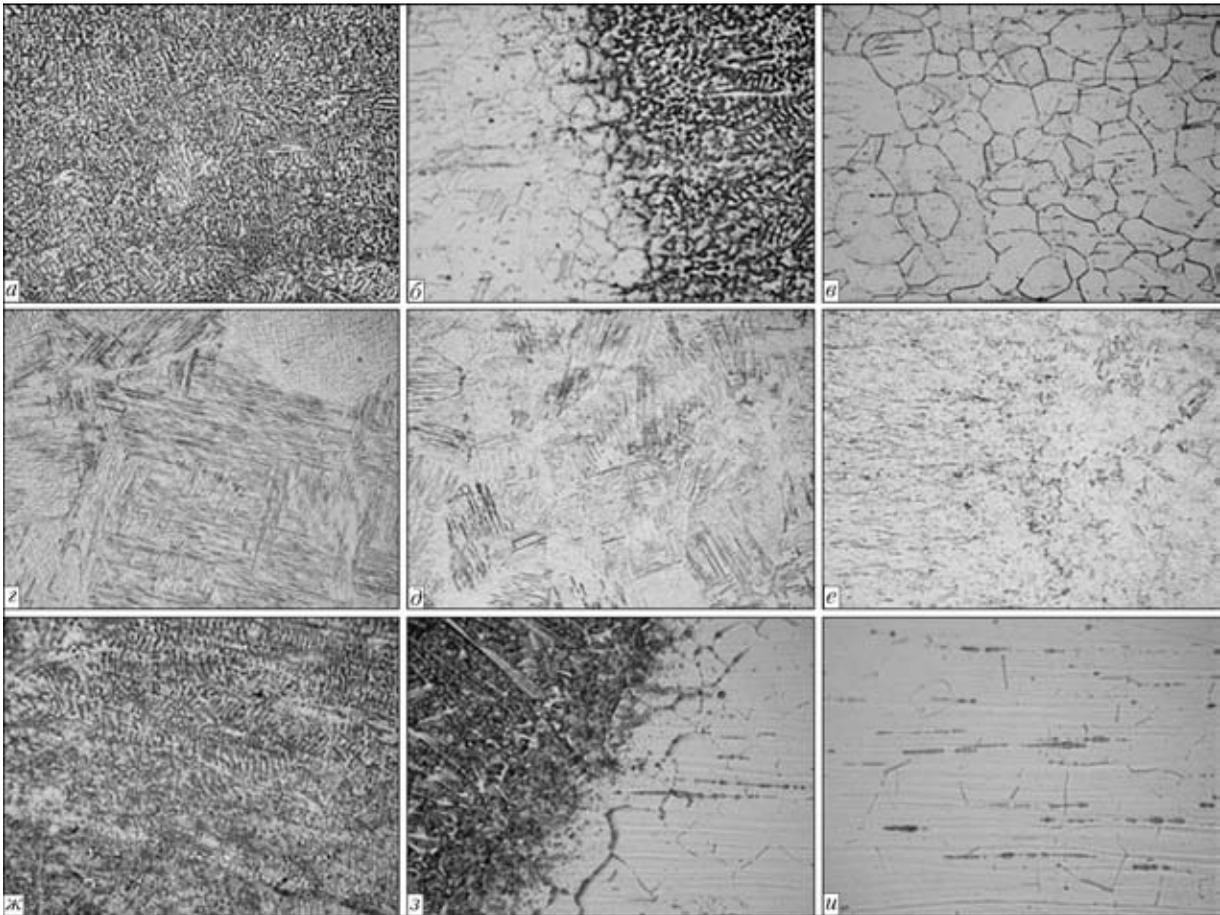


Рис. 4. Микроструктуры ($\times 320$) стыковых соединений труб из стали 304SS (а–в), сплава ПТ-3В (г–е) и сплава монель (ж–и), полученных ЭЛС: а, г, ж — центральные участки металла шва; б, д, з — участки зоны сплавления и крупного зерна ЗТВ; в, е, и — участки границы ЗТВ и основного металла

особенностью гидродинамических процессов переноса жидкого металла в узкой сварочной ванне.

Вместе с тем исследование микроструктуры металла ЗТВ от линии сплавления до границы с основным металлом соединений из сплава монель позволило также выявить наличие темных прослоек по границам зерен как в металле ЗТВ, так и в основном металле, чего не наблюдается в металле шва (см. рис. 4, ж–и).

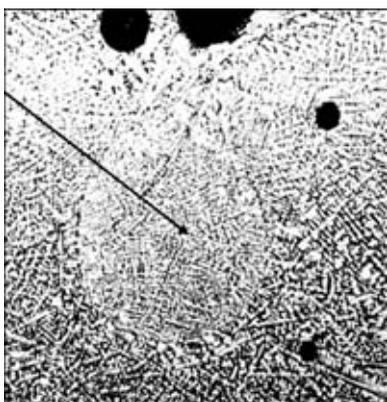


Рис. 5. Микроструктура ($\times 320$) металла шва соединения из сплава монель с пористостью и полостью, заполненной закристаллизовавшимся жидким металлом, после сварки (по стрелке)

Химический состав этих прослоек был изучен на растровом электронном микроскопе JSM-35CF («JEOL», Япония), снабженном системой энергодисперсионного микроанализатора INCA 350. Анализ электронных изображений подтвердил наличие темных прослоек по границам зерен (рис. 6), химический состав которых определили с помощью микроанализатора INCA 350.

Полученные результаты исследований этих участков свидетельствуют о повышенном содержании кислорода (до 2,0 %), а также алюминия (до 0,4 %) и титана (до 0,2 %) по сравнению с их содержанием в теле зерна. По-видимому, по границам зерен происходит преимущественное окисление с образованием оксидов Al_2O_3 и TiO_2 . Наличие оксидов по границам зерен может способствовать повышению напряжений в этих участках, что при определенных условиях может привести к развитию разрушения по ним, в чем, возможно, и есть причина полученных результатов испытаний на разрыв трубчатых соединений из сплава монель (табл. 3).

Результаты металлографических исследований хорошо согласуются с результатами испытаний на разрыв. Швы, выполненные за два прохода, имеют меньше неметаллических включений и пор



Т а б л и ц а 4. Распределение микротвердости сварных соединений труб, полученных орбитальной ЭЛС, МПа

№ п/п	Материал	Количество проходов	Основной металл	ЗТВ			Шов	
				Участок рекристаллизации	Участок перекристаллизации	Участок перегрева	Зона сплавления	Середина шва
1	304SS	1	3060	2920	2500	2130	2380	2430
2		2	2980	2530	2300	2050	2300	2430
3	ПТ-3В	1	2740	2480	2350	2300	2300	2740
4		2	2700	2390	2300	2200	2300	2700
5	Монель	1	1700	1650	1600	1550	1600	1740
6		2	1620	1600	1580	1550	1540	1580

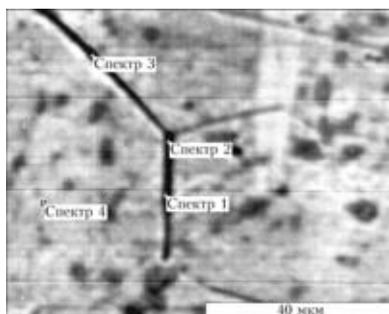


Рис. 6. Прослойки по границам зерен в зоне крупного зерна (у линии сплавления)

по сравнению с однопроходными и соответственно более высокие показатели прочности.

Микротвердость полученных соединений в области металла шва, ЗТВ и в основном металле имеет различные значения в зависимости от материала и количества проходов (табл. 4). Для исследуемых материалов микротвердость после второго прохода более стабильна, но на участке крупного зерна, вблизи линии сплавления, она несколько ниже, чем после первого прохода.

Исследования химической неоднородности микрорентгеноспектральным анализом показали равномерное и равнозначное распределение легирующих элементов в сварных соединениях из стали 304SS, титанового сплава ПТ-3В и сплава монель независимо от количества проходов.

Таким образом, способ орбитальной ЭЛС позволяет получить качественные сварные соединения трубок из нержавеющей сталей, сплава монель и титановых сплавов.

1. Масубиши К. Космические технологии соединений, разработанные в США // Техника сборки и соединения. — 1989. — № 8. — С. 103–108.

Investigations of properties and structure of metal of the tubular joints on steel 304SS, titanium alloy PT-3V and Monel alloy produced by orbital electron beam welding in vacuum are described. The investigations are oriented to using the orbital EBW equipment and technology to repair the pipelines mounted outside the functioning space facilities.

2. Суэздава Э. Космические станции и колонии. Сварка в космосе // Там же. — 1989. — № 9. — С. 66–75.

3. Применение сварки для ремонта космических объектов / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, В. Ф. Лапчинский и др. // Косм. исследования на Украине. — 1973. — Вып. 9. — С. 3–9.

4. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 184 с.

5. Некоторые принципы конструирования оборудования для технологических работ в космосе / Б. Е. Патон, В. Ф. Лапчинский, В. В. Стесин и др. // Технология в космосе: Тем. сб. докл. VI Гагаринских чтений. — М., 1977. — С. 16–23.

6. Ремонт трубопроводов орбитальной микросваркой ТИГ внутри обитаемых космических объектов / Е. Г. Терновой, А. Р. Булацев, Т. Г. Соломийчук, В. Ф. Шулым // Автомат. сварка. — 2010. — № 4. — С. 14–19.

7. Патон Б. Е. Космические технологии на рубеже третьего тысячелетия // Там же. — 2000. — № 4. — С. 3–5.

8. Космос: технологии, материаловедение, конструкции / Под ред. акад. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 с.

9. Абрамов Е. В., Ляшенко В. И., Семенов В. А. Автоматическая сварка тонкостенных труб малого диаметра из стали и титана. Прогрессивные методы обработки металлов и сплавов — Л.: ЛДНТП, 1975. — 27 с.

10. Сварка в машиностроении: Справочник. Т. 1 / Под ред. Н. А. Ольшевского. — М.: Машиностроение, 1978. — 304 с.

11. Гриненко В. И., Белкин С. А., Астафурова Н. И. Сварка неповоротных стыков труб из стали 1X18H9T методом автоопрессовки // Свароч. пр-во. — 1963. — № 10. — С. 27–29.

12. А.с. 212409 СССР., МКИ В 23к 9/16, 37/2. Способ сварки автоопрессовкой / В. В. Рошин, Л. И. Акулов, В. И. Гриненко и др. — Оpubл. 05.05.1968; Бюл. № 9.

13. Properties of weld joints made by self-compression method / V. V. Roschin, Yu. S. Ischenko, V. A. Bukarov, V. A. Khavanov. — [1985]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-901–85).

14. Мальцев М. Ф., Барсукова Т. А., Борин Ф. А. Металлография цветных металлов и сплавов. — М.: Металлургиздат, 1960. — 372 с.

15. Багрянский К. В., Кузьмин Г. С. Сварка никеля и его сплавов. — М.: Машгиз, 1963. — 164 с.

Поступила в редакцию 25.03.2010