



РЕМОНТ ТРУБОПРОВОДОВ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКОЙ ТИГ ВНУТРИ ОБИТАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

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

Проведены исследования по применению оборудования и технологии орбитальной ТИГ сварки с целью ремонта трубопроводов внутри функционирующих космических объектов. Изучены свойства и структурные особенности трубчатых соединений из стали 12Х18Н12Т, полученных способом автоопрессовки в условиях пониженного воздействия гравитации Земли.

Ключевые слова: орбитальная ТИГ сварка, трубопроводы, нержавеющая сталь, неповоротные стыки, пониженная гравитация, микрокамера, трубчатые соединения, механические свойства, макро- и микроструктура, микротвердость

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 комплекса «Мир», свидетельствует о том, что одними из наиболее уязвимых узлов являются технологические трубопроводы. Предполагается, что через 6...10 лет с начала эксплуатации МКС может возникнуть потребность в их ремонте и соответственно в способах и устройствах для его реализации.

По мнению авторов работ [1, 2], аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом (ТИГ) — один из основных способов сварки и ремонта трубопроводов в условиях космоса при использовании специализированных накидных камер с контролируемой атмосферой. Способ ТИГ как с подачей присадочных материалов, так и без нее, нашел широкое применение при изготовлении конструкций в различных отраслях промышленности [3–5].

Без присадочного материала обычно сваривают стыковые соединения с отбортовкой кромок, нахлесточные соединения, а также стыковые соединения без отбортовки кромок (в основном трубчатые) способом автоопрессовки [6–9]. При этом способе применяют многопроходную сварку, которую выполняют в непрерывном и импульсном режиме, а также с активирующими добавками [10–13]. Вопреки существующему мнению о вредном влиянии повторных нагревов при многопроходной сварке ТИГ наблюдается повышение прочности соединений по сравнению со швами,

сваренными с подачей присадочной проволоки, которая соответствует составу основного металла [14]. Разработкой технологии и оборудования для этих целей занимаются различные предприятия СНГ, а также многие иностранные фирмы. Однако оборудование и технологии для сварки и ремонта трубопроводов непосредственно в космосе отсутствуют.

В настоящей работе рассмотрено применение способа орбитальной ТИГ сварки для ремонта трубопроводов внутри функционируемых космических станций и изучены свойства многопроходных стыковых трубчатых соединений, полученных при отработке предварительной технологии, применительно к условиям микрогравитации.

В процессе проведения экспериментов применяли инверторный источник питания для сварки ТИГ «GUSMI-160». В качестве образцов использовали трубки из стали 12Х18Н12Т диаметром 10,0 мм и толщиной стенки 1,0 мм, которые сваривали встык без присадочных материалов. При этом использовали вольфрамовый электрод марки WT20 фирмы «Winzel» диаметром 1,6 мм с углом заточки 60° и притуплением 0,5 мм. В качестве защитного газа применяли аргон высшего сорта (ГОСТ 10157–79), расход которого составлял 4...6 л/мин.

На первом этапе выполняли сварку «на спуск» при неподвижном источнике дугового нагрева и горизонтально расположенной вращающейся трубкой. Такой выбор пространственного положения и способа выполнения процесса сварки предполагает минимальное воздействие на расплавленную сварочную ванну гравитационного поля Земли [15–18].

На втором этапе выполняли орбитальную сварку горизонтальными швами на вертикально расположенной неповоротной трубке с помощью накидной микрокамеры (рис. 1).

В результате проведенных работ были определены оптимальные режимы одно- и многопроходной сварки для обоих вариантов, свойства и

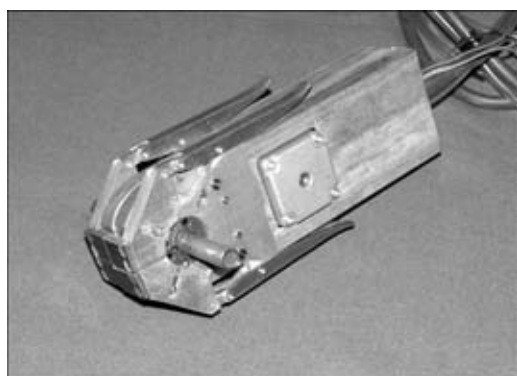


Рис. 1. Внешний вид накидной микрокамеры для орбитальной сварки ТИГ трубопроводов в условиях микрогравитации

структурные особенности соединений, полученных без подачи присадочной проволоки.

Качество полученных стыковых соединений оценивали путем внешнего осмотра, а также по макро- и микрошлифам. Химический состав основного металла (ОМ) и металла швов изучали с помощью спектрального анализа спектрометром ДФС-36. Временное сопротивление разрыву сваренных соединений определяли путем механических испытаний трубчатых образцов на разрывной машине ЦДМ-4 при температуре +20 °С. Металлографические исследования, фотосъемку геометрии и структуры металла как всего соединения, так и его отдельных участков выполняли на оптическом микроскопе «Neophot 32». Балл зерен

измеряли путем визуального сравнения с эталонами шкал в соответствии с ГОСТ 5639–82. Твердость соединений по Виккерсу при нагрузке 1,0 Н измеряли на трубчатых поперечных микрошлифах на микротвердомере М-400 фирмы «LECO» с шагом 0,3 мм. Структурные составляющие выявляли с помощью электрохимического травления в 20%-м водном растворе хромовой кислоты при напряжении 20 В в течение 10 с.

Для установления режимов сварки стыковых трубчатых соединений вначале выполняли проплавления на сплошных трубчатых образцах из стали 12Х18Н12Т. После этого стыковые соединения сваривали одним, а затем многопроходными швами.

Режимы сварки ТИГ стыковых трубчатых соединений «на спуск» и орбитальной были одни и те же (табл. 1). При этом первый проход выполняли со сквозным проплавлением, а последующие наплавочные проходы по первому шву — без сквозных проплавлений. В результате проведенных экспериментов установлено, что выбранные режимы сварки ТИГ со сквозным проплавлением стыковых трубчатых соединений из стали 12Х18Н12Т позволяют получать кольцевые швы за один проход с усиленным корневым валиком и незначительным ослаблением лицевой части шва (см. макрошлиф образца № 30 в табл. 1). Последующие опрессовочные проходы способс-

Таблица 1. Режимы сварки ТИГ стыковых соединений труб диаметром 10×1 мм из стали 12Х18Н12Т (скорость сварки 15 м/ч)

№ образца	Количество проходов	Ток дуги, А, при выполнении прохода				Макрошлиф соединения
		Один	Два	Три	Четыре	
30	Один	28	—	—	—	
41	Два	28	22	—	—	
56	Три	28	22	18	—	
58	Четыре	28	22	18	15	



Таблица 2. Химический состав (мас. %) ОМ и металла швов, полученных орбитальной многопроходной ТИГ сваркой на трубках из стали 12Х18Н12Т

№ образца	Количество проходов	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Cu
1 (ОМ)	—	0,63	1,15	18	11,6	0,85	0,22
27	Один	0,62	1,14	18	11,4	0,86	0,21
42	Два	0,62	1,13	17,8	11,5	0,85	0,21
50	Три	0,62	1,12	18	11,4	0,85	0,22
57	Четыре	0,62	1,12	17,8	11,6	0,85	0,22

Таблица 3. Результаты испытаний на растяжение ОМ и соединений труб диаметром 10×1 мм из стали 12Х18Н12Т, полученных орбитальной ТИГ сваркой и сваркой «на спуск»

№ образца	Количество проходов	Место разрушения	Результаты испытаний σ_v , МПа	
			ОМ	сварное соединение
1, 2, 3	—	ОМ	782...788	—
72, 76, 79 28, 29, 31	Один	Шов	—	605...635 610*...630*
82, 84, 85 43, 44, 45	Два	ЗТВ	—	638...657 635*...660*
87, 89, 90 51, 52, 53	Три	»	—	635...647 638*...650*
92, 93, 98 60, 61, 62	Четыре	»	—	612...637 608*...642*

* Образцы выполнены сваркой «на спуск».

твуют получению швов с усилением верхней части шва, что видно на макрошлифах образцов 41, 56, 58 табл. 1.

Анализ макрошлифов соединений показал, что путем выбора основного и опрессовочных режимов сварки можно достичь оптимальной геометрии и удовлетворительного формирования верхнего и корневого валиков усиления как для сварки «на спуск», так и для орбитальной сварки. Равномерность проплавления корня шва и его усиления достигается в результате стабильной скорости сварки, которую обеспечивает шаговый двигатель KRS392S-4015-Z121-W60, управляе-

мый драйвером KRD1250i, и стабилизации тока сварки инверторного источника питания «GUS-MI-160». Последующими (опрессовочными) проходами, которые выполняли дугой меньшей мощности, повторно прогревается металл шва первого прохода, а также ЗТВ. При этом в зоне нагрева до температур пластичного и упругопластичного состояния металл подвергается местной пластической деформации (выпучивается) под действием внутренних сжимающих напряжений. Таким образом, усиление шва получают без приложения внешних сжимающих усилий и присадочного материала для обоих вариантов.

Химический состав металла шва соединений, полученных за один, два, три и четыре прохода без присадочного материала, практически не отличается от ОМ (табл. 2).

Сравнив значения временного сопротивления разрыву стыковых соединений труб диаметром 10×1 мм из стали 12Х18Н12Т, полученных для вариантов сварки «на спуск» и орбитальной сварки, при различных количествах сварочных проходов (табл. 3), следует отметить, что наименьшее значение прочности было получено после первого и четвертого проходов.

Наиболее приемлемые результаты получены после второго и третьего проходов (0,80...0,84 σ_v ОМ).

Исследования неметаллических включений в соединениях из стали 12Х18Н12Т, полученных без присадочной проволоки для вариантов сварки «на спуск» и орбитальной сваркой, показали, что в ОМ наблюдаются единичные и строчечные оксиды (рис. 2, а, б), а в металле шва после первого



Рис. 2. Микроструктуры (×500) ОМ и металла шва с неметаллическими включениями в них: а — цепочки оксидов в ОМ вдоль проката; б — сульфиды в ОМ, вытянутые вдоль проката; в — включения корунда и силикатов в однопроходном металле шва

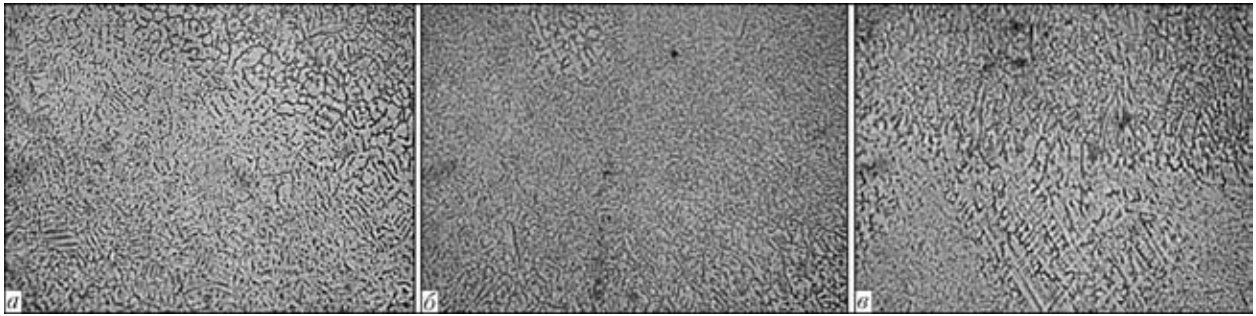


Рис. 3. Микроструктура ($\times 320$) металла шва трубчатого соединения из стали 12Х18Н12Т, полученного орбитальной ТИГ сваркой за четыре прохода: *а, б* — металл шва соответственно после первого и второго проходов; *в* — на границе третьего и четвертого проходов

прохода — единичные включения корунда и мелкие силикаты глобулярной формы (рис. 2, *в*).

Необходимо также отметить наличие включений нитридов титана в металле шва после первого прохода и в зоне сплавления.

После второго и последующих проходов неметаллические включения в швах и в зоне сплавления наблюдались значительно реже.

Макроструктура металла шва, полученного при орбитальной сварке за четыре прохода, приведена в табл. 1 (образец № 58), где шов имеет усиление как по наружной поверхности, так и в его корневой части. Металл шва плотный, без пор, трещин и других дефектов, форма шва симметричная, микроструктура этого соединения показана на рис. 3.

Литая структура шва представляет собой двухфазную систему — аустенит и δ -феррит. Структура металла шва после первого прохода дисперсная. Содержание δ -феррита в металле шва составляет примерно 1...1,5%. В металле шва после второго прохода зерно аустенита увеличивается и уменьшается количество δ -феррита (до 0, 5...1%). После третьего и четвертого проходов структура металла шва более мелкодисперсная, чем после первого прохода. Неметаллические включения в шве и в зоне сплавления встречаются значительно реже, чем в металле шва после первого прохода.

В металле ЗТВ с двух сторон шва наблюдается типичная аустенитная структура (рис. 4).

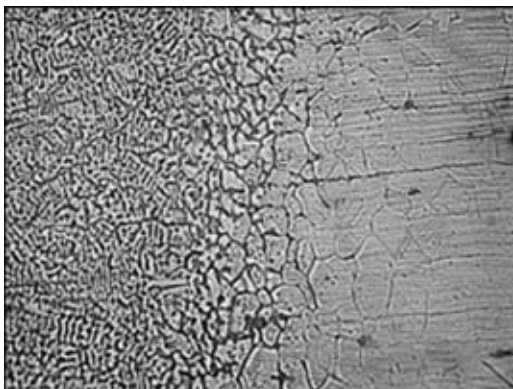


Рис. 4. Микроструктура ($\times 500$) металла ЗТВ соединения из стали 12Х18Н12Т, полученного орбитальной сваркой ТИГ за четыре прохода

Небольшое количество δ -феррита (до 0,5 %) выявлено на участках, прилегающих к линии сплавления. Размер зерна на участке крупного зерна ЗТВ с двух сторон одинаков и соответствует баллу № 5 (ряд 3). На участке мелкого зерна размер зерен соответствует баллу № 8 (ряд 3). Микроструктура ОМ состоит из аустенитных зерен балла № 6 (ряд 3) и представляет собой аустенит и δ -феррит с ярко выраженной текстурой проката. Вдоль волокон проката наблюдаются неметаллические включения, а также частицы карбидов. Балл зерна на границе ОМ — участок неполной перекристаллизации соответствует баллу № 7 (ряд 3).

Микротвердость соединений измеряли по верхним срезам наружных поверхностей трубок в перпендикулярном направлении к шву.

Показатели твердости металла шва, ЗТВ и ОМ отличаются между собой. Кроме того, на значения твердости влияет и количество сварочных проходов. На рис. 5 показаны распределения микротвердости для сварных трубчатых соединений, полученных за один, два и четыре прохода, где максимальная микротвердость составляет 2750 МПа в центре однопроходного шва, а минимальная в этом же соединении на участке крупного зерна — 1650 МПа в металле ЗТВ. В швах с двумя проходами характер распределения микротвердости остался таким же, как и после первого прохода, однако значения микротвердости стали несколько ниже. А после третьего и особенно после чет-

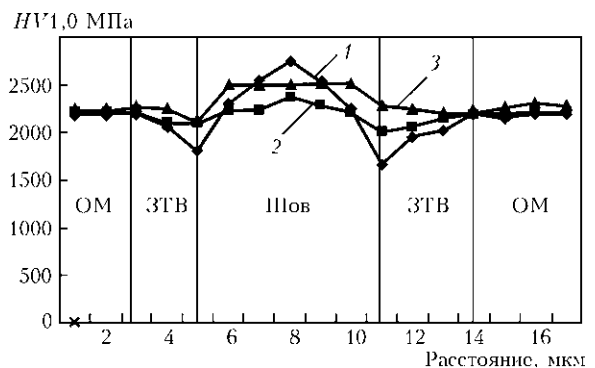


Рис. 5. Распределение микротвердости соединений труб (образец № 47) из стали 12Х18Н12Т, полученных орбитальной сваркой ТИГ за один (1), два (2) и три (3) прохода



вертого проходов распределение микротвердости более стабильно по всему сечению шва и достигает значения 2500 МПа.

Таким образом, экспериментально показана возможность получения качественных сварных соединений тонкостенных труб из нержавеющей стали 12Х18Н12Т при ремонте трубопроводов методом орбитальной сварки ТИГ.

1. *Некоторые* принципы конструирования оборудования для технологических работ в космосе / Б. Е. Патон, В. Ф. Лапчинский, В. В. Стесин и др. // Тем. сб. докл. IV Гагаринских чтений: «Технология в космосе». — М.: Изд-во МАИ, 1977. — С. 16–23.
2. *Применение* сварки для ремонта космических объектов / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, В. Н. Бернадский и др. // Косм. исследования на Украине. — 1976. — Вып. 9. — С. 3–5.
3. *Руссо В. Л.* Дуговая сварка в инертных газах. — Л.: Судостроение, 1984. — 120 с.
4. *Современные* технологии в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева. — М.: Машиностроение, 1977. — 416 с.
5. *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. — С. 27.
6. *Сварка* в машиностроении: Справочник: В 4 т. — Т.1 / Под ред. Н. А. Ольшанского. — М.: Машиностроение, 1978. — С. 223–226.
7. *Гриненко В. И., Белкин С. А., Астафурова Н. И.* Сварка неповоротных стыков труб из стали 1Х18Н9Т методом автоопрессовки // Свароч. пр-во. — 1963. — № 10. — С. 27–29.
8. *А. с. 212409 СССР, МКИ В 23 К 9/16, 37/2.* Способ сварки автоопрессовкой / В. В. Рошин, Л. И. Акулов, В. И. Гриненко и др. // Открытия. Изобрет. — 1968. — № 9. — С. 52.
9. *А. с. 1593828 СССР, МКИ В 23 К 9/16.* Способ дуговой сварки неповоротных стыков трубопроводов в газозащитной среде / О. М. Новиков, В. П. Морочко, В. О. Токарев и др. // Там же. — 1990. — № 35. — С. 38.
10. *Автоматическая* дуговая сварка стыков трубопроводов методом автоопрессовки / В. В. Рошин, Ю. С. Ищенко, В. А. Букаров и др. // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Сварка в ядерной технологии. — 1985. — Вып. 1. — С. 73–81.
11. *Ищенко Ю. С., Гриненко В. И., Павлов Ю. С.* Импульсная аргодуговая сварка неплавящимся электродом неповоротных стыков труб из стали 1Х18Н9Т // Свароч. пр-во. — 1965. — № 12. — С. 16–18.
12. *А. с. 899296 СССР.* Способ сварки плавлением стыковых соединений / В. А. Букаров, Ю. С. Ищенко, В. Г. Лошакова // Открытия. Изобрет. — 1982. — № 3. — С. 65.
13. *Комбінована* технологія орбітального зварювання неповоротних стиків трубопроводів / М. М. Савицький, О. М. Савицький, Г. М. Мельничук та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. / За ред. Б. Є. Патона. — Київ: ІБЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. — С. 379–382.
14. *Properties of weld joints made by self-compression method* / V. V. Roshchin, Yu. S. Ishchenko, V. A. Bukarov, V. A. Khavanov. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-901-85).
15. *Ищенко Ю. С.* Физико-технологические основы формирования швов в процессе дуговой сварки // Тр. НИКИМТ / Под ред. Л. Н. Щавелева. — М.: ИздАТ, 2002. — Т. 2. — С. 204–237.
16. *Ищенко Ю. С., Гречишкин В. И.* Оценка веса сварочной ванны и геометрических размеров зоны проплавления // Свароч. пр-во. — 1966. — № 11. — С. 30–31.
17. *Особенности* электроннолучевой сварки в различных пространственных положениях / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. Е. Локшин, К. С. Акопьянц // Автомат. сварка. — 1972. — № 6. — С. 1–4.
18. *Кайдалов А. А.* Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. — Изд. 2, перераб. и доп. — Киев: Екотехнологія, 2004. — 260 с.

Investigations on application of equipment and technology for orbital TIG microwelding to repair pipelines inside functional space objects were carried out. Properties and structural peculiarities of 12Kh18N12T steel tubular joints made by auto-pressing under conditions of decreased impact by the Earth gravitation were studied.

Поступила в редакцию 18.11.2009

НОВЫЕ СЕРТИФИКАТЫ НАКС

ООО «Северсталь-метиз: сварочные материалы» получило сертификаты Национального агентства контроля и сварки (НАКС) на марки стальных сварочных проволок Св-08Г2С и Св-08ГА по группе КСМ (конструкции стальных мостов).

С введением в конце 2008 г. жестких требований, регламентирующих строительство КСМ, предприятия мостостроения стали предъявлять повышенные требования к качеству всех материалов, применяемых, в том числе, при производстве сварочных работ. Основным материал, используемый для возведения мостов, высокопрочные стали типа 15ХСНД. В связи с этим предел прочности сварного шва должен составлять не менее 510 МПа.

Специалисты «Северсталь-метиз: сварочные материалы» учли жесткие требования по группе КСМ внесли изменения в нормативную документацию. Для испытаний в лабораториях НАКС были предоставлены опытные образцы омедненной проволоки и проволоки без покрытия Св-08Г2С тонких диаметров (1,2; 1,6; 2,0 мм), Св-08ГА диаметром 4,0 мм, произведенные согласно измененной документации. Проволока успешно прошла испытания, качество сварного шва было признано отвечающим всем требованиям предприятий мостостроения. На основании полученных данных НАКС выдал сертификаты соответствия по группам СК (стальные конструкции) и КСМ.

ООО «Северсталь», ул. Мира, 30 г. Череповец, 162608 Волгоградская область Россия
Тел.: (8202) 531261; факс: (8202) 533010