

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.041>

УДК 621.791:629.78

**Л. М. Лобанов, Ю. А. Асніс, Є. Г. Терновий,
В. Ф. Шулим, О. Р. Булацев, В. А. Крюков, Т. О. Лікаренко**

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона
Національної академії наук України, Київ, Україна

ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОРБІТАЛЬНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА РЕМОНТУ ТРУБОПРОВОДІВ В КОСМОСІ

На станціях, які функціонують в космічних умовах, використовують велику кількість трубопроводів, виготовлених із різних корозійностійких матеріалів (нержавіюча сталь, титанові сплави тощо). Вони розташовані як усередині станцій, так і за її бортом. У процесі тривалої експлуатації станцій трубопроводи з різних причин (корозія, механічні пошкодження тощо) можуть виходити з ладу і потребують ремонту в умовах космосу. Дослідженнями, проведеними в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, встановлено, що надійним і перспективним технологічним процесом для ремонту трубопроводів в космічних умовах є зварювання. Метою даної роботи є розробка спеціалізованого обладнання і технологій для зварювання і ремонту трубопроводів усередині та зовні космічних пілотованих станцій. Для проведення досліджень зі зварювання трубчастих з'єднань було створено лабораторне обладнання та розроблено технології зварювання і ремонту неповоротних трубопроводів у космічних умовах. Для цього було відпрацьовано технології орбітального зварювання труб з нержавіючих сталей та титанових сплавів аргонно-дуговим та електронно-променевим способами. Розроблено режими зварювання (зварювальний струм, напруга на дузі та прискорена напруга електронного пучка, швидкості зварювання). Визначено попередні режими орбітального проплавлення суцільних трубчастих зразків і режими зварювання неповоротних стикових з'єднань одно- та багатопрохідними швами. При першому проході зварювання виконували з наскрізним проплавленням для формування кореневого валика, а повторні проходи по першому і наступному швах виконували як наплавочні з заключним формуванням верхнього валика і поступовим виводом кратера. Вивчено механічні властивості одержаних зварних з'єднань при кімнатних та низьких температурах і їхній хімічний склад. Досліджено макро-і мікроструктуру та твердість одержаних зварних з'єднань. Проведено випробування на стійкість зварних з'єднань до міжкристалітної корозії. Випробування на часовий опір розриву стикових трубчастих з'єднань нержавіючих і титанових сплавів при температурах випробувань +20 °С та –196 °С показали, що зварювання орбітальними аргонно-дуговим та електронно-променевим способами дозволяє одержати з'єднання, близькі за міцністю до основного металу. Проведені дослідження на хімічну неоднорідність показали, що зварні з'єднання, одержані аргонно-дуговим та електронно-променевим способами, рівнозначні за хімічним складом до основного металу. Вивчення макро- і мікроструктур, геометрії і твердості з'єднань із нержавіючих і титанових сплавів, одержаних орбітальними способами, показали задовільну та стабільну якість цих з'єднань. Випробування на МКК свідчать про стійкість до міжкристалітної корозії трубчастих з'єднань із сталі 12X18H10T та титанового сплаву ПТ-3В, які були одержані орбітальними способами аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання. Вперше розроблено та виготовлено дослідні зразки обладнання та принципові технології орбітального аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання усередині та зовні функціонуючої космічної станції. Проведено випробування виготовленого обладнання, на якому одержали орбітальними способами зварювання дослідні зразки стикових трубчастих з'єднань для механічних і фізико-хімічних досліджень. Результати механічних і фізико-хімічних досліджень показали, що орбітальне зварювання аргонно-дуговим та електронно-променевим способами дозволяє одержати якісні зварні з'єднання, близькі за міцністю і хімічним складом до основного металу.

© Л. М. ЛОБАНОВ, Ю. А. АСНІС, Є. Г. ТЕРНОВИЙ, В. Ф. ШУЛИМ,
О. Р. БУЛАЦЕВ, В. А. КРЮКОВ, Т. О. ЛІКАРЕНКО, 2018

Ключові слова: космічні станції, трубопроводи, неповоротні стики, аргонно-дугове зварювання, електронно-променеве зварювання, нержавіючі сталі, титанові сплави, трубчасті з'єднання, мікрокамера, електронно-променевий нагрівач, режими зварювання, автоопресування, зовнішні дефекти, внутрішні дефекти, механічні властивості, хімічний склад, макро- і мікроструктура, мікротвердість, міжкристалінна корозія.

На пілотованих космічних станціях використовують велику кількість трубопроводів діаметрами 8...20 мм з товщиною стінки 0.5...1.5 мм, виготовлених із різних корозійностійких матеріалів (нержавіюча сталь, титанові сплави тощо). Вони розташовані як усередині станції, так і за її бортом. У процесі тривалої експлуатації станцій трубопроводи з різних причин (корозія, механічні пошкодження тощо) можуть виходити з ладу і потребують ремонту в умовах космосу. Надійним і перспективним технологічним процесом у таких випадках є зварювання.

Дослідженнями, проведеними в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, встановлено, що найкращими способами ремонту трубопроводів, розташованих усередині космічного модуля, є зварювання в накидних камерах з контрольованою захисною атмосферою аргону або гелію [8, 10], а для ремонту трубопроводів, розташованих зовні станції, — електронно-променеве зварювання [6, 7, 9].

Незважаючи на наявність обладнання досить широкої номенклатури для орбітального зварювання в земних умовах [1—5] такого обладнання для космічних умов немає.

Метою даної роботи є розробка спеціалізованого обладнання і технологій для зварювання і ремонту трубопроводів усередині та зовні космічних пілотованих станцій.

У процесі проведення експериментів з орбітального аргонно-дугового зварювання застосовували лабораторну установку з інверторним джерелом живлення GYSMI-160 (рис. 1). Для електронно-променевих зварювань був створений спеціалізований лабораторний енергокомплекс з електронно-променевим нагрівачем, який мав можливість обертатися навколо неповоротної труби. За зразки використовували трубки із сталей 12X18H10T, 304SS та титанових сплавів BT1-0 та ПТ-3В діаметрами 10.0, 12.8, 16.3 мм і товщиною стінки 1.0...1.5 мм, які зварювали встик без присадкових матеріалів.

Орбітальне аргонно-дугове зварювання з'єднань трубчастих зразків із сталі 12X18H10T і титанового сплаву BT1-0 виконували одним та багатопрохідними швами. А при електронно-променевому зварюванні застосовували одно- та двопрхідне орбітальне зварювання зразків із сталі 304SS та титанового сплаву ПТ-3В. Для вказаних способів визначали оптимальні режими зварювання.

При відпрацьовуванні режимів зварювання оцінку якості одержаних стикових з'єднань контролювали візуальним оглядом верхнього та зворотного (кореневого) валиків шва на наявність зовнішніх дефектів, показниками механічних та хімічних властивостей, а також по макро-мікрошліфах за допомогою мікроскопа МБС-9 здійснювали контроль геометрії з'єднань, глибини провару, та наявності внутрішніх дефектів. При цьому основними критеріями візуальної якості зварних трубчастих з'єднань вважаються: наявність підсилення верхнього та кореневого валиків шва, поступовий вивід кратера, відсутність раковин та бокових підрізів швів. При вивченні макро-мікроструктур якості з'єднання оцінювалася по наявності пор, тріщин та неметалевих включень у металі шва і в зоні термічного впливу, твердість з'єднання та його корозійна стійкість.

Хімічний склад основного металу і металу швів визначали мікрорентгеноспектральним аналізом на мікроаналізаторі SX-50 фірми «Самеса». Міцність розриву трубчастих з'єднань, одержаних аргонно-дуговим зварюванням, визначали шляхом механічних випробувань зразків на розривній машині ЦДМ-10 при температурі +20 °С, а для з'єднань, виконаних електронно-променевим зварюванням, і при температурі –196 °С. Для металографічних досліджень використовували оптичний мікроскоп «Neophot 32». Бал зерен вимірювали шляхом візуального порівняння з еталонами шкал.

Мікротвердість з'єднань визначали на поздовжніх мікрошліфах мікротвердоміром М-400 фірми LECO з кроком 0.3 мм.

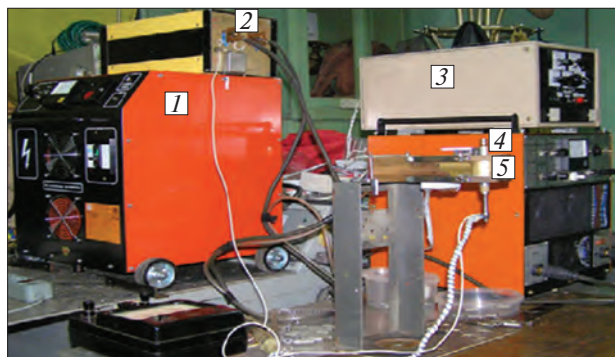


Рис. 1. Лабораторна установка для наземного відпрацювання технології орбітального аргонно-дугового зварювання трубопроводів усередині космічної станції: 1 — джерело живлення GYSMI-160, 2 — високочастотний підпалювач дуги, 3 — програматор режимів зварювання, 4 — система керування процесом зварювання, 5 — орбітальний пристрій

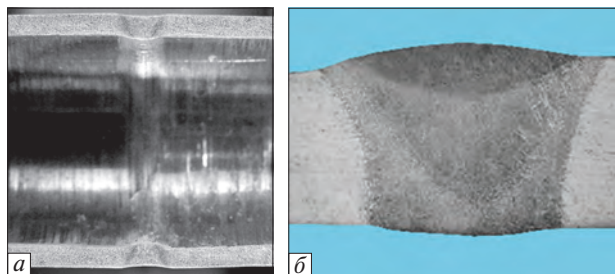


Рис. 2. Макрошліфи стикових з'єднань труб діаметром 10 мм та товщиною 1.0 мм із сталі 12X18H10T, одержаних аргонно-дуговим зварюванням способом автоопресування: а — за один прохід, б — за два проходи з виводом кратера

Схильність трубчастих з'єднань на стійкість до міжкристалітної корозії (МКК) визначали згідно з ДСТУ EN ISO 3651-2: за методом А для

зразків із сталі 12X18H10T і за методом Б для титанового сплаву ПТ-3В, одержаних аргонно-дуговим та електронно-променевим зварюванням. Оцінку результатів випробувань на стійкість до МКК виконували металографічним методом за допомогою мікроскопа «Neophot 21». Для цього виготовляли шліфи, які протравлювали електрохімічним способом в 10 % розчині щавелевої кислоти до слабого виявлення границь зерен. Густина струму під час травлення становила $(1.0 \pm 0.2) \times 10^4$ А/м².

Дослідження зі зварювання виконували в два етапи. На першому проводили експерименти з орбітального аргонно-дугового зварювання способом автоопресування [3, 4]. Для визначення попередніх режимів зварювання спочатку одержували проплави суцільних трубчастих зразків, а після цього зварювали неповоротні стикові з'єднання одно- та багатопрхідними швами. При першому проході зварювання виконували з наскрізним проплавленням для формування кореневого валика (рис. 2, а), а повторні проходи по першому і наступному швах — як наплавочні з заключним формуванням верхнього валика і поступовим виведенням кратера (рис. 2, б).

Після проведених робіт визначали параметри наскрізних і повторних проплавів на суцільних трубках, а також режими зварювання неповоротних стикових з'єднань із сталі 12X18H10T і сплаву ВТ1-0. Режими аргонно-дугового зварювання стикових трубчастих з'єднань наведено у табл. 1. Різні значення струму дуги для кожного проходу при зварюванні трубок пояснюються тим, що при зварюванні способом автоопресу-

Таблиця 1. Режими зварювання стикових трубчастих з'єднань, одержаних аргонно-дуговим способом з наскрізним першим проходом та трьома повторними проходками

Номер зразка	Діаметр, товщина, мм	Матеріал	Струм дуги, А		Напруга дуги, В	Швидкість зварювання, м/год
			І _{д1}	І _{д2-4}		
10	10.0 × 1.0	12X18H10T	26	15...18	10	15
13	12.8 × 1.2	12X18H10T	30	15...18	11	15
20	16.3 × 1.5	12X18H10T	30	20...18	11	15
40	10.0 × 1.0	ВТ1-0	31	18...17	11	8

вання для одержання верхнього підсилення валика шва кожний наступний шов повинен виконуватися як наплавочний, без перекриття глибини проплавлення попереднього шва. При цьому у шві виникають напруження скорочення, які формують підсилений верхній валик. Різні швидкості зварювання для сталі 12X18H10T і сплаву ВТ1-0 обумовлені тим, що титановий сплав ВТ1-0 — тугоплавкий метал, для зварювання якого потрібна більша погонна енергія, ніж при зварюванні сталі 12X18H10T.

Перший етап завершено експериментами з відпрацювання попередньої технології орбітального аргонно-дугового зварювання стиків труб для ремонту трубопроводів у космічних умовах. Для цього виготовили дослідний зразок мікрокамери орбітального аргонно-дугового зварювання стиків труб (рис. 3, а). На пристрої відпрацьовано принципову технологію орбітального аргонно-дугового зварювання неповоротних стиків труб із сталі 12X18H10T і сплаву ВТ1-0 діаметром 10 мм з товщиною стінки 1 мм. Стовкові з'єднання одержували за два проходи: один основний прохід з посиленням коренем шва, а другий опресувальний — з виводом кратера для одержання підсилення верхньої частини валика.

На другому етапі виконували орбітальне електронно-променеве зварювання розробленим прямонакальним нагрівачем (рис. 3, б). При цьому для проведення експериментів використовували зразки труб діаметром 12.8 мм із нержавіючої сталі 304SS та титанового сплаву ПТ-3В. В ході відпрацювання технології виконували проплави на суцільних зразках, а потім — стикові з'єднання труб.

В результаті проведених експериментів розроблено попередню технологію електронно-про-

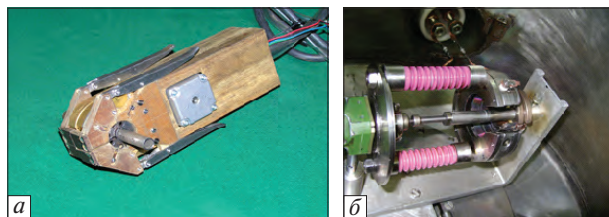


Рис. 3. Дослідний зразок мікрокамери для орбітального аргонно-дугового зварювання трубопроводів, розташованих усередині космічної станції (а), та електронно-променевий нагрівач для орбітального зварювання труб зовні космічної станції (б)

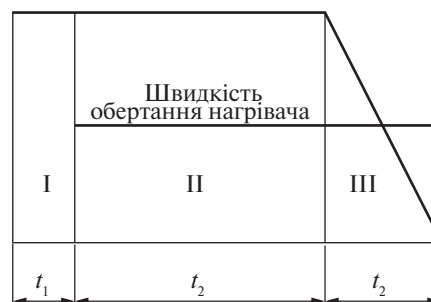


Рис. 4. Характер зміни технологічних параметрів зварювального циклу при орбітальному електронно-променевому зварюванні труб: I — «гарячий старт», $t_1 = 0...5$ с; II — час зварювання, $t_2 = 30$ с; III — виведення кратера, $t_3 = 0...5$ с

меневого орбітального зварювання трубчастих з'єднань із сталі 304SS та титанового сплаву ПТ-3В при потужності пучка до 400 Вт і прискорювальній напрузі 10 кВ. Режими зварювання наведено в табл. 2. При виконанні експериментальних проплавлень орбітальним електронним пучком було встановлено, що для забезпечення формування зварного шва суттєво впливають значення і характер немонотонної зміни технологічних параметрів на початку зварювального процесу (який називають «гарячий старт»), а також при його завершенні (виведення кратера).

Таблиця 2. Режими зварювання стикових трубчастих з'єднань, одержаних орбітальним електронно-променевим зварюванням труб $\varnothing 12.8 \times 1.0$ мм за два проходи

Номер зразка	Матеріал	$I_{\text{пуч.}}, \text{ мА}$	$U, \text{ кВ}$	$V_{\text{зв.}}, \text{ м/год}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$
19	304SS	35	9.2	22	0.5	14	3
2	ПТ-3В	32.5	9.5	36	1.5	8	3.5

Примітка: t_1, t_2, t_3 — проміжки часу зварювального циклу.

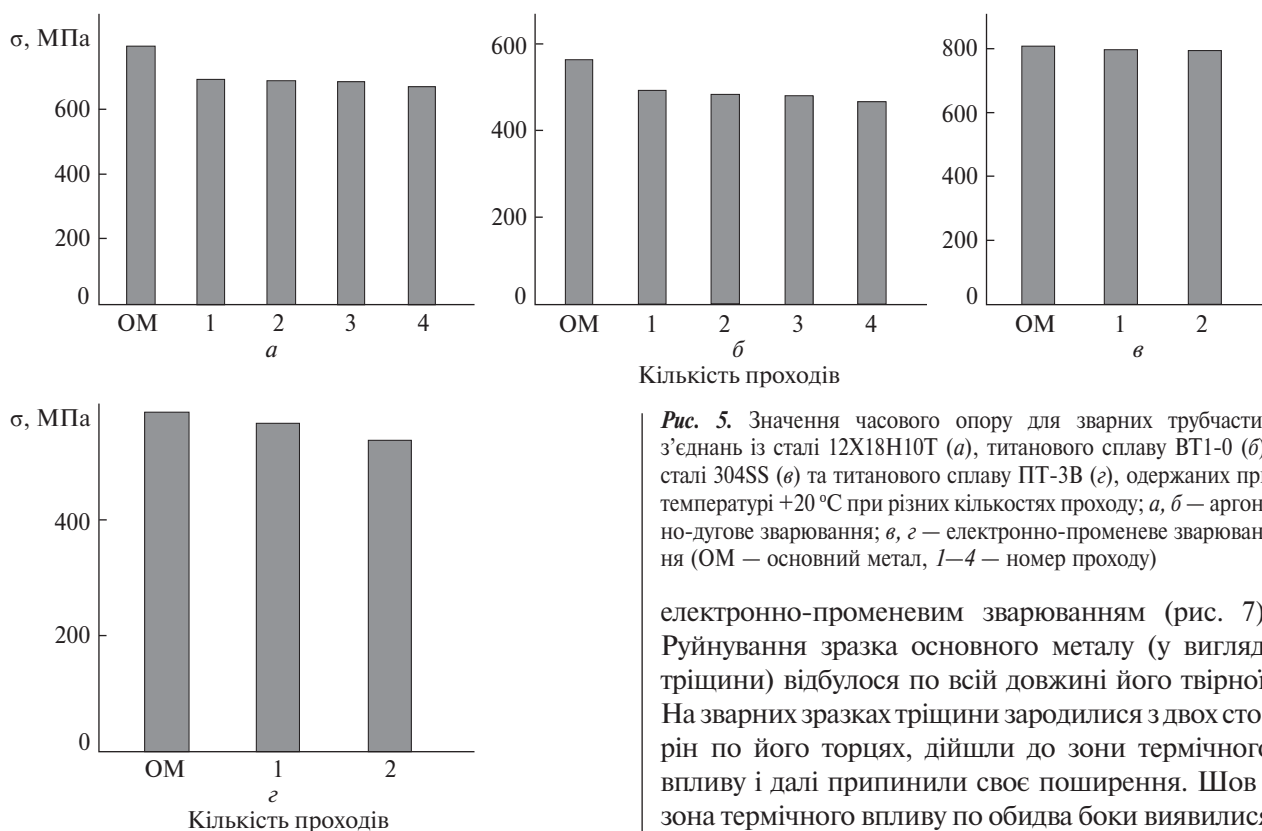


Рис. 5. Значення часового опору для зварних трубчастих з'єднань із сталі 12X18H10T (а), титанового сплаву BT1-0 (б), сталі 304SS (в) та титанового сплаву ПТ-3В (г), одержаних при температурі +20 °С при різних кількостях проходу; а, б — аргонно-дугове зварювання; в, г — електронно-променеве зварювання (ОМ — основний метал, 1–4 — номер проходу)

електронно-променевим зварюванням (рис. 7). Руйнування зразка основного металу (у вигляді тріщини) відбулося по всій довжині його твірної. На зварних зразках тріщини зародилися з двох сторін по його торцях, дійшли до зони термічного впливу і далі припинили своє поширення. Шов і зона термічного впливу по обидва боки виявилися настільки пластичними, що спрацювали як гасники тріщин. Це можна пояснити тим, що зона термічного впливу при зварюванні вказаним способом є більш пластична порівняно з основним металом труби, яка не зазнавала термічної обробки.

Дослідження хімічної неоднорідності за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу показало рівномірний розподіл легуючих елементів у зварних з'єднаннях.

Вивчено мікроструктури з'єднань, одержаних способами аргонно-дугового та електронно-променевого зварювання (рис. 8, 9).

Результати металографічних досліджень корелюють з результатами випробувань на часовий опір розривом. Шви, виконані способами аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання за два проходи, більш щільні та якісні, порівняно з однопровідними, та мають менше неметалевих включень.

Для аргонно-дугового зварювання стикових з'єднань із сталі 12X18H10T бал зерна у металі шва дорівнює 6, у навколошовній зоні — 4–5, в центрі зони термічного впливу біля зони рекристалізації — 5–6, а на кордоні з основним металом — 4–5.

Циклограма процесу має вигляд, представлений на рис. 4.

Проведені випробування механічних властивостей зварних трубчастих з'єднань при температурі +20 °С показані на гістограмах рис. 5, а при температурах –196 °С — на рис. 6.

В результаті випробувань на часовий опір розриву стикових трубчастих з'єднань $\varnothing 10 \times 1.0$ мм із сталі 12X18H10T і титанового сплаву BT1-0 в умовах температури +20 °С, виконаних аргонно-дуговим зварюванням за два проходи, встановлено, що він дорівнює $0.80 \dots 0.84 \sigma_{\text{в}}$ основного металу, а зразків із сталі 304SS та титанового сплаву ПТ-3В, одержаних електронно-променевим зварюванням також за два проходи, — $0.87 \dots 0.9 \sigma_{\text{в}}$ основного металу. Дані випробувань при температурах –196 °С трубчастих зразків із сталі 304SS та сплаву ПТ-3В, одержаних електронно-променевим зварюванням, показали коефіцієнт міцності $0.9 \dots 0.95 \sigma_{\text{в}}$ основного металу.

Проведено випробування на сплющення трубчастих з'єднань із сплаву ПТ-3В, одержаних

Рис. 6. Значення часового опору на розрив при температурі випробувань -196°C трубчастих з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням: *a* — сталь 304SS, *б* — титановий сплав ПТ-3В (1 — основний метал, 2 — зварні з'єднання)

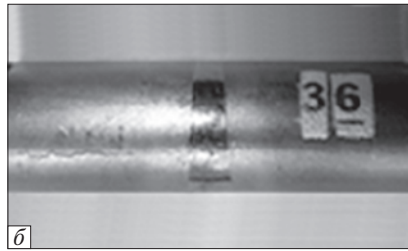
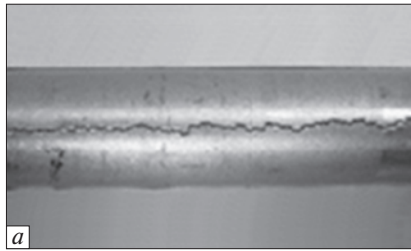
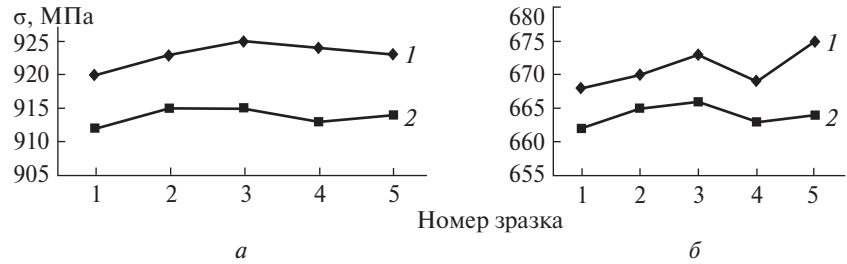


Рис. 7. Зразки зварних трубчастих з'єднань із титанового сплаву ПТ-3В, одержаних електронно-променевим зварюванням, після випробувань на сплющення: *a* — основний метал; *б* — зварювання двома проходами і з наскрізним проваром по всьому внутрішньому периметру

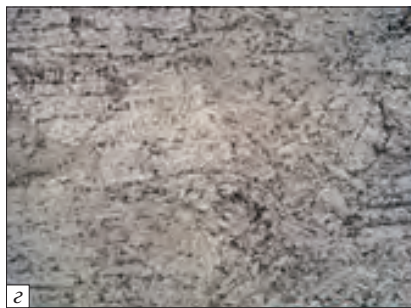
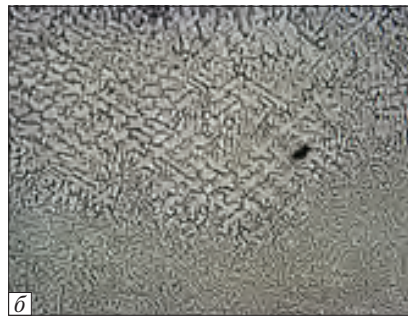


Рис. 8. Мікроструктури трубчастих стикових з'єднань із сталі 12X18H10T (*a, б, в*) та сплаву BT1-0 (*г, д, е*), одержаних аргонно-дуговим зварюванням: *a, г* — центральні ділянки металу шва; *б, д* — ділянки швів другого проходу; *в* — ділянка кордону лінії сплавлення та зони термічного впливу, *е* — ділянка зони термічного впливу і основного металу

У випадку електронно-променевого зварювання з'єднань зі сталі 304SS показники більш якісні, ніж сталі 12X18H10T: в центрі шва бал зерна сягає 6—7, в зоні термічного впливу біля лінії сплавлення — 6, на ділянці дрібного зерна — 7—8. Лита мікроструктура шва

(рис. 10, *a*) має двофазну систему (аустеніт та δ -ферит). Склад δ -фериту у металі шва дорівнює 1...1.5 %. Мікроструктура зони термічного впливу однакова з обох боків шва, що свідчить про рівномірний нагрів цієї зони при зварюванні.

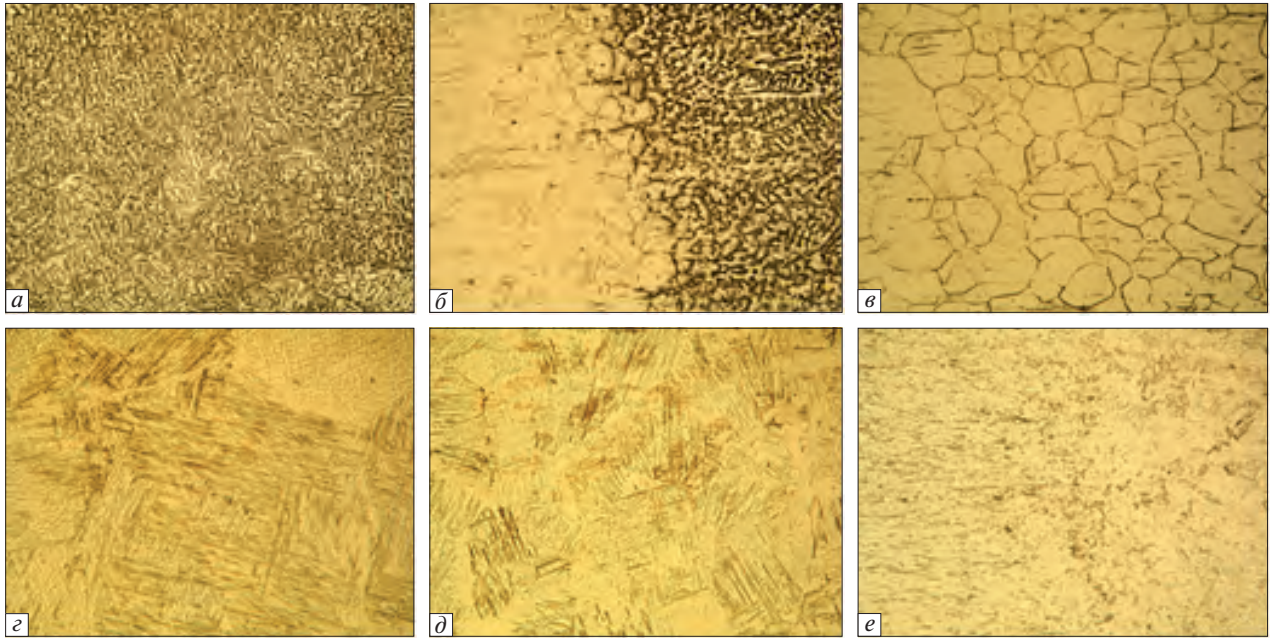


Рис. 9. Мікроструктури трубчастих стикових з'єднань із сталі 304SS (а, б, в) та сплаву ПТ-3В(г, д, е), одержаних електронно-променевим зварюванням: а, г — центральні ділянки металу шва; б, д — ділянки кордону лінії сплавлення і зони термічного впливу; в, е — ділянки кордону зони термічного впливу і основного металу

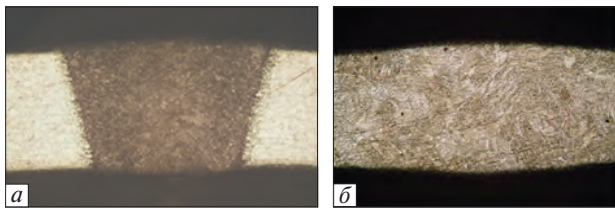


Рис. 10. Мікроструктури поперечного перетину з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням труб за два проходи: із сталі 304SS (а) та титанового сплаву ПТ-3В (б)

На рис. 10, б наведено мікроструктуру загального виду стикового з'єднання із титанового сплаву ПТ-3В, одержаного електронно-променевим зварюванням за два проходи. Структура металу шва також лита, однорідна, дрібнодисперсна і має голчато-пластинчасту α -фазу. У металі шва не виявлено структури двійників, на відміну від швів з одним проходом. Структура складається із великих зерен α -фази (бал зерна 1, рис. 9, г), дефектів у швах не зафіксовано. Зона термічного впливу має зерна α -фази різного розміру: на ділянці великого зерна — бал 3, на ділянці дрібного зерна — бал 6 (рис. 9, д), на ділянці неповної перекристалізації — бал 7 (рис. 9, е).

Значення мікротвердості з'єднань із сталі 12Х18Н10Т, одержаних аргонно-дуговим зварюванням, для металу шва і зони термічного впливу різні та залежать від кількості зварювальних проходів. Шов з одним проходом має максимальну твердість до 2750 МПа в центрі, а мінімальну — до 1850 МПа — у зоні термічного впливу. Після другого проходу характер розподілу твердості більш рівномірний, але значення твердості дещо нижчі. У центрі шва максимальна твердість сягає 2600 МПа, а мінімальна — в зоні рекристалізації — 1750 МПа.

Після третього та четвертого проходів твердість стає більш стабільною, але ще нижчою, і по всьому перетину шва вона становить 2500 МПа. Значення твердості у з'єднаннях сплаву ВТ1-0, одержаних аргонно-дуговим зварюванням, також залежать від кількості проходів. Відносно стабільними і достатньо високими значення твердості стають після другого проходу.

Розподіл мікротвердості з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням, визначали за тією ж методикою, що і з'єднань, виконаних аргонно-дуговим зварюванням. Дані щодо мікротвердості для

металу шва і зони термічного впливу сталі 304SS мають також різний характер і показники, в залежності від кількості зварювальних проходів.

Шов з одним проходом має максимальну твердість в центрі шва до 2350 МПа (2750 МПа для аргонно-дугового зварювання), а мінімальну — в зоні рекристалізації — до 2320 МПа (1850 МПа для аргонно-дугового зварювання) при твердості основного металу 3060 МПа. Після другого проходу характер розподілу твердості дещо стабілізувався, але значення твердості знизилися. Для титанового сплаву ПТ-3В ці показники мають такі ж тенденції, при цьому зона термічного впливу і шов виявилися настільки пластичними, що затримали поширення тріщин при випробуваннях на сплюснення.

Проведені випробування на МКК свідчать про стійкість до міжкристалітної корозії трубчастих з'єднань із сталі 12X18H10T та титанового сплаву ПТ-3В, виконані за допомогою орбітального аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання. Після випробувань на мікрошліфах виявлено, що границі металу шва і основного металу мають різномірну структуру, а це свідчить про те, що МКК не виявлено.

ВИСНОВКИ

1. Вперше розроблено дослідні зразки обладнання та принципові технології орбітального аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання усередині та зовні пілотованої космічної станції.

2. Встановлено, що в дослідженому діапазоні параметрів оптимальні режими зварювання відповідають такій швидкості, при якій на вибраній потужності стабільно формується як кореневий валик підсилення, так і верхній валик. З огляду на геометрію зварних швів такі режими дозволяють одержати якісні зварні з'єднання.

3. Одержані результати випробувань на часовий опір розриву стикових трубчастих з'єднань нержавіючих та титанових сплавів при температурах випробувань +20 °C та -196 °C показали, що зварювання аргонно-дуговим та електронно-променевим способами дозволяє одержати з'єднання, близькі за міцністю до основного металу.

4. Розроблено проектно-конструкторську документацію та виготовлено дослідний зразок мі-

крокамери для орбітального аргонно-дугового зварювання неплавким вольфрамовим електро-дом у контрольованій атмосфері інертних газів. Виготовлено дослідний зразок нагрівача для орбітального електронно-променевого зварювання труб малих діаметрів.

5. Проведені випробування на МКК свідчать про стійкість до міжкристалітної корозії трубчастих з'єднань із сталі 12X18H10T та титанового сплаву ПТ-3В, виконані за допомогою орбітального аргонно-дугового і електронно-променевого зварювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. А. с. SU 1299375 A1, МКИ 6H01J 1/20. Электронный кольцевой нагреватель / Коновалов А. И., Никонов А. В. — Опубл. 10. 11. 95. — Бюл. № 31.
2. Боровик В. М., Шубин Ф. В., Фролов О. В. ЭЛС неповоротных стыков трубчатых изделий // Всесоюз. научно-техн. конф. «Прогрессивные процессы сварки в машиностроении»: Тез. докл., 25 — 30 мая 1991. — Красноярск, 1991. — С. 123—124.
3. Букаров В. А., Ищенко Ю. С. Технология автоматической дуговой сварки трубных соединений и перспективы ее совершенствования // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварка в ядерной технике. — 1985. — Вып. 1. — С. 52—63.
4. Гриненко В. И., Белкин С. А., Астафурова Н. И. Сварка неповоротных стыков труб из стали 1X18H9T методом автоопрессовки // Сварочное производство. — 1993. — № 10. — С. 27—29.
5. Ильинский А. М. Особенности разработки оборудования для сварки полым термоэмиссионным катодом в невесомости // Изб. тр. Юбилейный сборник «Ракетно-космические технологии». — М.: Техномаш, 2003. — С. 17—23.
6. КОСМОС: технологии, материаловедение, конструкции: сбор. научн. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 + 24 с. вкл.
7. Патон Б. Е. Космические технологии на рубеже третьего тысячелетия // Автомат. сварка. — 2000. — № 4. — С. 3—5.
8. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Бернадский В. Н. и др. Применение сварки для ремонта космических объектов // Космич. исслед. на Украине. — 1976. — Вып. 9. — С. 3—5.
9. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 182 с.
10. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф., Стесин В. В. и др. Некоторые принципы конструирования оборудования для технологических работ в космосе // Технология в космосе: Тем. сб. докл. IV гагаринских чтений. — М., 1977. — С. 16—23.

Стаття надійшла до редакції 12.03.18

REFERENCES

1. A. s. SU 1299375 A1, MKI 6H01J 1/20. Elektronnyy koltsevoy nagrevatel. Kononov A. I., Nikonov A. V. — Opubl. 10.11.95. Byul. N 31.
2. Borovik V. M., Shubin F. V., Frolov O. V. ELS nepovorotnykh stykov trubchatykh izdeliy // Vsesoyuznaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Progressivnye protsessy svarki v mashinostroenii” 25 — 30 maya 1991: Tezisy dokladov — Krasnoyarsk, P. 123—124 (1991).
3. Bukarov V. A., Ishchenko Yu. S. Tekhnologiya avtomaticheskoy dugovoy svarki trubnykh soedineniy i perspektivy ee sovershenstvovaniya // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Svarka v yadernoy tekhnike, vyp. 1, M.: TsNIIAtomInform. P. 52—63 (1985).
4. Grinenko V. I., Belkin C. A., Astafurova N. I. Svarka nepovorotnykh stykov trub iz stali 1Kh18N9T metodom avtoopressovki. *Svarochnoe proizvodstvo*, N 10, p. 27—29 (1993).
5. Ilinskiy A. M. Osobennosti razrabotki oborudovaniya dlya svarki polym termoemissionnym katodom v nevesomosti. Izbrannye trudy. Yubileyny sbornik “Raketno-kosmicheskie tekhnologii”. Moskva, “Tekhnomash”. P. 17—23. (2003).
6. SPACE: Tekhnologii, materialovedenie, konstruktzii: sbor. nauch. trud / Pod red. B. E. Patona, 528 p. (IES im. E. O. Patona NAN Ukrainy, Kiev, 2000) [in Russian].
7. Paton B. E. Kosmicheskie tekhnologii na rubege tretogo tysyacheletiya. *Avtomaticheskaya svarka*, N 4, p. 3—5 (2000).
8. Paton B. E., Dudko D. A., Bernadskii V. N. Primenenie svarki dlya remonta kosmicheskikh obektov. Kosmicheskie issledovaniya na Ukraine. Kiev, Naikova dumka, Vp. 9, p. 3—5 (1976).
9. Paton B. E., Lapchinsky V. F. Svarka i rodstvennye tekhnologii v kosmose, 182 p. (Naukova dumka, Kiev, 1998).
10. Paton B. E., Lapchinsky V. F., Stesin V. V. Nekotorye printsipy konstruirovaniya oborudovaniya dlya tekhnologicheskikh rabot v kosmose. Tekhnologiya v kosmose: Tem. Sbornik doklad. IV gagarinskikh chteniy. M., p. 16—23 (1977).

Received 12.03.18

Л. М. Лобанов, Е. А. Аснис, Е. Г. Терновой,
В. Ф. Шулим, А. Р. Булацев, В. А. Крюков, Т. А. Лікаренко

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ И РЕМОНТА ТРУБОПРОВОДОВ В КОСМОСЕ

На станциях, которые функционируют в космических условиях, используют большое количество трубопроводов, изготовленных из различных коррозионностойких материалов (нержавеющая сталь, титановые сплавы и

др.). Они расположены как внутри станции, так и за ее бортом. В процессе длительной эксплуатации станций трубопроводы по различным причинам (коррозия, механические повреждения и др.) могут приходить в негодность и требуют ремонта в космических условиях. Исследованиями, проведенными в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, установлено, что надежным и перспективным технологическим процессом для ремонта трубопроводов в космических условиях есть сварка. Целью данной работы является разработка специализированного оборудования и технологий для сварки ремонта трубопроводов внутри и за бортом космических пилотируемых станций. Для проведения исследований по сварке трубчатых соединений было создано лабораторное оборудование, разработаны технологии сварки и ремонта неповоротных трубопроводов для космических условий. Для этого были разработаны технологии орбитальной сварки труб из нержавеющей сталей и титановых сплавов аргонодуговым и электронно-лучевым способами. Определены режимы сварки (ток сварки, напряжение дуги и ускоряющее напряжение электронного пучка, скорости сварки). Исследованы предварительные режимы орбитального проплавления сплошных трубчатых образцов и режимы сварки неповоротных стыковых соединений одно- и многопроходными швами. При первом проходе сварку выполняли со сквозным проплавлением для формирования корневого валика, а повторные проходы по первому и последующему швам выполняли как наплавочные с завершающим формированием верхнего валика и постепенным выводом кратера. Изучены механические свойства полученных сварных соединений при комнатных и низких температурах и их химический состав. Исследованы макро- и микроструктура и твердость полученных сварных соединений. Проведены испытания стойкости сварных соединений на межкристаллитную коррозию. Испытания на временное сопротивление разрыву стыковых трубчатых соединений нержавеющей и титановых сплавов при температурах испытаний +20 °C и –196 °C показали, что сварка орбитальными аргонодуговым и электронно-лучевым способами позволяет получить соединения, близкие по прочности к основному металлу. Исследования на химическую неоднородность показали, что сварные соединения, полученные аргонодуговым и электронно-лучевым способами, равнозначны по химическому составу с основным металлом. Исследования макро- и микроструктур, геометрии и твердости соединений из нержавеющей и титановых сплавов, полученных орбитальными способами, показали удовлетворительное и стабильное качество этих соединений. Проведенные испытания на МКК свидетельствуют о стойкости к межкристаллитной коррозии трубчатых соединений из стали 12X18H10T и титанового сплава ПТ-3В, которые получены орбитальными способами аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой. Впер-

вые разработаны и изготовлены опытные образцы оборудования и принципиальные технологии орбитальной аргонно-дуговой и электронно-лучевой сварки внутри и снаружи функционирующей космической станции. Проведены испытания изготовленного оборудования, на котором получены орбитальным способом опытные образцы стыковых трубчатых соединений для механических и физико-химических исследований. Результаты механических и физико-химических исследований показали, что орбитальные способы аргонно-дуговой и электронно-лучевой сварки позволяют получить качественные соединения, близкие по прочности и химическому составу к основному металлу.

Ключевые слова: космические станции, трубопроводы, неповоротные стыки, аргонно-дуговая сварка, электронно-лучевая сварка, нержавеющие стали, титановые сплавы, трубчатые соединения, микрокамера, электронно-лучевой нагреватель, режимы сварки, автоопрессовка, внешние дефекты, внутренние дефекты, механические свойства, химические свойства, макро- и микроструктура, микротвердость, межкристаллитная коррозия.

L. M. Lobanov, E. A. Asnis, E. G. Ternovoi, V. F. Shulym, A. R. Bulactev, V. A. Kryukov, T. A. Likarenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR ORBITAL WELDING AND REPAIR OF PIPELINES IN SPACE

The orbital space stations consist of a large number of pipelines made of various types of corrosion-resistant materials (stainless steel, titanium alloys, etc.). They are located both inside and outside the space station. These pipes can wear out for various reasons (corrosion, mechanical damage, etc.) during the long-term exploitation of the station, and so there is a need for their repair in space conditions. Studies conducted at the Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine showed that a reliable and prospective pipeline repair process in space conditions is the welding. We present the results of a development of specialized equipment and welding technologies for the repair of pipelines inside and outside the manned spacecrafts. The issues related to the design of the laboratory equipment for the welding of tubular connections as well as the development of welding technologies and equipment for the repair of fixed pipelines in the space environment are considered. We have developed the technology of orbital welding of pipes of stainless steels and titanium alloys by means of the

argon arc and the electron beam welding methods. The technological requirements for modes of welding (welding current, arc voltage and the accelerating voltage of the electron beam, the speed of welding) are defined. Preliminary modes of the orbital weld penetration of solid tube samples and butt joints welding modes with single and multi-pass seams were studied. On the first pass the welds were performed with the formation of the penetration bead. The repeated passes along the first and subsequent seams were performed as a surfacing with the final formation of the top bead and gradual formation of the crater. Mechanical properties of the obtained welded joints at the room and low temperatures and their chemical composition as well as their macro and microstructure and hardness are studied. The resistance of welded joints to intergranular corrosion was tested. Tests for temporal resistance to rupture of tubular butt-joints of stainless and titanium alloys were made at the test temperatures of + 20 °C and –196 °C. They showed that the welding with orbital argon-arc and electron-beam methods makes it possible to obtain the joints that are close in strength to the base metal. The studies on a chemical heterogeneity have shown that welded joints performed by argon-arc and electron-beam methods are equivalent in chemical composition to the base metal. Studies of macro and microstructures, geometry and hardness of joints made of stainless and titanium alloys and performed by orbital methods have demonstrated a satisfactory and stable quality of these joints. The results of tests carried out at the International Space Station showed the resistance of tubular joints from the 12X18H10T steel and PT-3B titanium alloy to intercrystalline corrosion. Both joints are performed by orbital methods with the argon-arc and electron-beam welding. For the first time, the prototypes of equipment and basic technologies of orbital argon-arc and electron-beam welding inside and outside the operating space station are developed and manufactured. During the tests of the equipment, the prototypes of butt-type tubular joints for mechanical and physicochemical studies were obtained by the orbital method. The results of the studies have shown that the orbital methods of argon-arc and electron-beam welding make it possible to obtain qualitative joints that are close in strength and chemical composition to the main metal.

Keywords: space stations, pipelines, toggling joints, argon arc welding, electron beam welding, stainless steel, titanium alloys, tubular joints, mikrocamera, electron beam welding modes, heater, autopressurization, external defects, internal defects, mechanical properties, chemical properties, macro- and microstructure, microhardness, intergranular corrosion.