

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗВАРЮВАННЯ В КОСМОСІ*

Б.Є. Патон

Останнє десятиліття знаменується величезними досягненнями людства в освоєнні космічного простору. Вони стали можливими завдяки бурхливому розвитку науки та техніки, створенню нових галузей науки. Можна без перебільшення сказати, що космічні дослідження сприяли справжній науково-технічній революції, що мала величезний вплив і продовжує впливати на розвиток усієї нашої техніки та промисловості.

Зварники з великою гордістю та задоволенням відзначають, що створення сучасних ракетно-космічних систем стало можливим лише на основі застосування високонадійних та економічних зварних конструкцій, завдяки розробці та освоєнню нових способів та технологічних процесів зварювання.

Якщо перший етап космічних досліджень потребував бурхливого розвитку зварювальної науки і техніки, зварювального виробництва на нашій планеті, то другий етап, пов'язаний з польотами до інших планет і висадженням на них людини, вимагатиме якісно нових рішень, створення космічної зварювальної техніки.

Не можна уявити збирання на навколосемних орбітах міжпланетних кораблів, створення орбітальних станцій-лабораторій, будівництво на інших планетах різних споруд, нарешті всілякі ремонтні роботи поза та всередині космічних кораблів без найширшого застосування зварювання та різання.

Задачі зварювання та різання в космосі. Як відомо, при освоєнні навколосемного космосу всі ракети і космічні кораблі будувались і збирались повністю на Землі. Після виходу на задану орбіту корабель від'єднувався від останнього ступеня ракети і практично був готовий до подальшої роботи. Скидання захисних кожухів та обтічників, випускання антен, розкриття сонячних батарей та інші операції виконувались системами управління, що існували на кораблі.

Зі створенням важких міжпланетних кораблів, орбітальних космічних станцій-лабораторій виникає необхідність виводу на орбіту значно більших корисних навантажень, у зв'язку з цим раціональним стає збирання об'єктів на орбіті з окремих блоків, що були доставлені туди заздалегідь.

Створення кораблів і станцій безпосередньо на орбіті дозволить застосовувати конструкції, що найбільш пристосовані до орбітальних умов,

конструкції, які просто не можуть бути створені на Землі та у зібраному вигляді виведені на орбіту.

У цьому випадку кораблі і станції будуть збиратися з різних елементів, у тому числі з останніх ступенів ракет, відпрацьованих паливних баків, а також з типових блоків, що мають оптимальне співвідношення ваги до корисного об'єму. Зібрані конструкції повинні мати досконалу герметизацію, чого найпростіше досягти, застосовуючи зварювання. Тут потрібні різні способи зварювання та різання, спеціальне обладнання, що враховує специфіку космічних умов, на чому ми зупинимося нижче. Поки зазначимо, що при зварюванні об'єктів на орбіті повинні використовуватися повністю автоматизовані процеси з дистанційним управлінням, аналогічні до тих, що використовуються на Землі при роботі з атомними реакторами та капсулами з радіоактивними речовинами, а також полуавтоматичні та ручні процеси зварювання, які виконуються безпосередньо людиною.

У найближчі роки людина повинна висадитися на Місяць. Слідом за першою висадкою виникає необхідність будівництва на Місяці спеціальних укриттів, що забезпечують нормальні умови існування людей без застосування спеціального захисного одягу, й окремих приміщень для роботи, відпочинку та приймання їжі. Окремі блоки цих укриттів буде доставлено з Землі, а їх збирання та зварювання повинні бути зроблені на Місяці в умовах вакууму та сили тяжіння, що складає 1/6 від нашої земної.

Конструкції цих укриттів будуть досить складними, враховуючи необхідність створення надійного протирадіаційного і протиметеоритного захисту, а також повної герметичності.

Обмежені об'єми космічних кораблів, що запускаються, можуть потребувати також використання конструкцій, що трансформуються. До них слід віднести складчасті, рулоновані, телескопічні, надувні металеві конструкції. Розглядаються також пружні газонепроникні тканини, що легко складаються; конструкції з використанням мембрани та надувні сотові конструкції; складчасті конструкції, основою яких є гнучкі матеріали, що являють собою високостійкі герметичні тканини та плівки. У майбутньому можливе створення кераміки, яка буде значно легше за металеві сплави. У той же час вона буде стійкішою до зносу та зміни температури, не

*Матеріали з архіву акад. Б.Є. Патона (кінець 60-х років минулого століття).

підлягатиме корозії, матиме необхідні теплоізоляційні властивості. Все це дуже важливо при створенні виробів аерокосмічного призначення.

Збирання та зварювання металевих і неметалевих місячних укріплень потребують створення спеціального зварювального обладнання, яке може відрізнитися від застосованого для виконання зварювальних операцій на орбітах.

Виконання ремонтних операцій на орбіті висуває дуже серйозні вимоги до зварювального обладнання.

Цілком очевидно, що при ремонті ушкоджень, що виникли з-за метеоритних частинок, місце ушкодження не може бути заздалегідь передбачено. Тому зварювальне обладнання повинно забезпечувати можливість виконання ремонтних робіт у будь-якому місці конструкції. Якщо мова йде про теплообмінники ядерних установок, то очевидно, що зварювальні ремонтні роботи повинні виконуватись дистанційно без безпосередньої участі людини.

Спосіб зварювання, «накладок-латок» у місці дефекту, який виник, істотно залежить від середовища на об'єкті, що ремонтується.

Так, наприклад, киснева атмосфера всередині космічних кораблів створює суттєві труднощі для застосування способів зварювання, що супроводжуються високими температурами та в окремих випадках розбризкуванням розплавленого металу.

Ремонтні зварювальні операції можуть знадобитися і при посадках кораблів на інші планети, у тому числі і на Місяць. За допомогою різання та зварювання необхідно буде усувати пошкодження, що виникають при посадках кораблів.

На підставі сказаного ясно, що для виконання ремонтних робіт в космосі необхідні автоматичні, напівавтоматичні та ручні способи зварювання та різання.

Зрештою, треба сказати, що холодне зварювання, яке легко може бути здійснено в космічному вакуумі, є також і великою небезпекою. Космічний корабель може перестати нормально функціонувати внаслідок приварювання стопорних пристроїв у люках, шлюзах та інших конструкціях. Можуть вийти з ладу найважливіші системи управління, якщо приваряться електричні контакти. Під дією надвисокого космічного вакууму будуть випарюватися густе масло та мастило. Будуть також випаровуватись плівки адсорбованих газів і домішок, які утворилися в атмосфері. Видалення цих плівок дозволяє отримати щільний контакт металевих поверхонь, у результаті чого для зварювання необхідний дуже невеликий питомий тиск і невеликий нагрів.

Таким чином, поряд з корисним використанням холодного зварювання в космосі треба створювати умови, що перешкоджають довільному холодному зварюванню різних вузлів, у першу чергу, що виконані з м'яких металів.

З урахуванням задач зварювання в космосі, які можуть бути сформульовані вже сьогодні, можна надати наступну класифікацію космічного зварювального обладнання: автоматична апаратура разової дії з програмним управлінням, що монтується в місцях майбутніх зварних з'єднань ще на Землі; автоматична апаратура багаторазової дії, що керується дистанційно за допомогою механічних маніпуляторів або телевізійних установок; апаратура-інструмент для автоматичного зварювання, якою безпосередньо керує зварник-космонавт; зварювальний інструмент для ручного та напівавтоматичного зварювання, яким керує вручну зварник-космонавт.

Особливості зварювання в космосі. При розробці способів зварювання та обладнання потрібно враховувати властивості космічного простору: невагомість; вакуум; коливання температури; випромінювання; електричне та магнітне поле Землі та Місяця.

Розглянемо коротко можливий вплив цих факторів на процеси зварювання та різання. Необхідно враховувати вплив космічних умов на хід фізико-хімічних процесів при різних способах зварювання та на можливість проведення збирання та зварювання людиною.

Почнемо з першого. Знаходячись у космосі, людина перебуває у стані невагомості в глибокому вакуумі. Тому вона повинна одягти досить об'ємний космічний скафандр, що утруднює рухи.

Звичайні інструменти (гайкові ключі, викрутки, дрилі тощо), а також звичайні зварювальні пристрої будуть непридатними, коли людина знаходиться в стані невагомості. Тут потрібні інструменти з нульовою реакцією, тобто інструменти, які не передають оператору ніяких зворотних сил. Дуже серйозною проблемою є збирання в космосі конструкцій, які потребують зварювання. Для запобігання переміщень космонавта, що не зв'язаний жорстко з корпусом корабля, при виконанні різних робіт у космосі необхідно застосовувати інструмент з фіксаторами, що сприймають реактивний момент, або спеціальний інструмент з дуже невеликим реактивним моментом, що діє на космонавта. Там, де це практично можливо, доцільно виконувати складні роботи при жорсткому кріпленні космонавта до корпусу корабля (рис. 1). Для цього можуть бути використані механічні

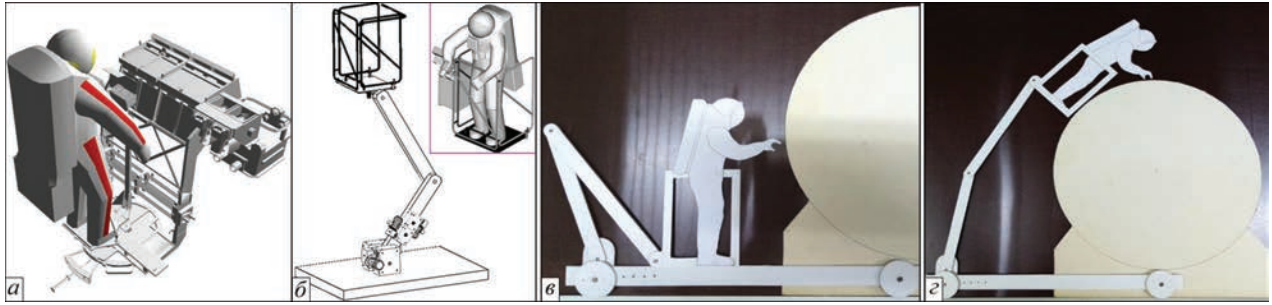


Рис. 1. Робоче місце космонавта для виконання технологічних робіт у відкритому космосі: *а* — загальне компонування площадки оператора-зварника зі зварювальним інструментом; *б* — площадка оператора-зварника; *в* — маніпулятор робочого місця; *г* — робоче місце оператора-зварника (проміжні фази положення робочого місця під час обслуговування модуля)

складні або роздвигні пристрої, магніти та клейкі речовини.

Використання магнітів небажане внаслідок впливу магнітних полів на роботу електронної апаратури корабля та зварювальних установок. Крім того, для кораблів і станцій широко застосовуються немагнітні матеріали. Цікавим є використання різних маніпуляторів, що є аналогічними до розроблених для атомної промисловості та для виконання робіт в умовах, небезпечних для життя космонавта (рис. 2).

При збиранні різних конструкцій на орбіті одним з рішень може бути установка легких зварювальних автоматів поблизу майбутніх зварних швів ще на Землі. Ними керують з Центрального пульта та вони використовуються тільки одноразово. Проте збирання кораблів і станцій на орбіті потребує також і ручного виконання низки збиральних і зварювальних робіт в таких умовах, коли жорстке кріплення тіла космонавта до корпусу корабля неможливе. У цьому випадку однією з основних задач є розробка способів стабілізації тіла людини. Тут можуть бути використані наспинні установки з системою газодинамічних рулів і різного виду гіроплатформи, які поглинають моменти, що виникають при роботі космонавта.

Цілком очевидно, що проблема стабілізації тіла космонавта-зварника, можливість точного виконання їм достатньо складних рухів, що забезпечують якісне зварювання на орбіті, є однією зі складніших задач у загальному комплексі зварювання в космосі (рис. 1, *г*).

Космічні умови суттєво впливають на характер фізико-хімічних процесів при зварюванні. Так, наприклад, невагомість може докорінно впливати на процес перенесення металу в дузі при зварюванні плавким електродом. Внаслідок обмеженої потужності джерела живлення в космічному кораблі зварювання відбувається при порівняно невеликих струмах дуги, коли електродинамічне зусилля, потрібне, щоб відірвати краплю, також є невеликим. У результаті на кінці електрода утворюватимуться

краплі великого розміру, що часто відриваються під впливом випадкових чинників. При цьому вони можуть не потрапити в зварювальну ванну, а «попливти» у космічному просторі. Невагомість не дозволить проводити зварювання плавленням у космосі при великих об'ємах рідкого металу в зварювальній ванні, тому що при цьому не буде забезпечено нормальне формування та кристалізація зварного шва. Невагомість також може негативно впливати на дегазацію зварювальної ванни, тому що відсутність сили тяжіння не дозволить нормально спливати та виділятися бульбашкам газу, що знаходяться в рідкому металі. Невагомість не дозволить застосовувати в космічних умовах шлаковий захист і обробку шлаком металу зварювальної ванни при дуговому зварюванні плавким електродом.

Глибокий вакуум у космосі (до 10^{-12} мм рт. ст.) також суттєво впливає на характер протікання процесів зварювання. При такому вакуумі є неможливим горіння дуги з неплавким електродом. При використанні плавкого електрода є можливим горіння дуги в парах металу. Проте і в цьому випадку для стабілізації дугового розряду слід приймати спеціальні заходи.

В умовах глибокого космічного вакууму можна отримати задовільні результати, застосовуючи плазмову дугу. Проте тут вже є потреба в доставці в космос плазموутворюючого газу. Захисний газ, наприклад аргон, дозволить також виконува-

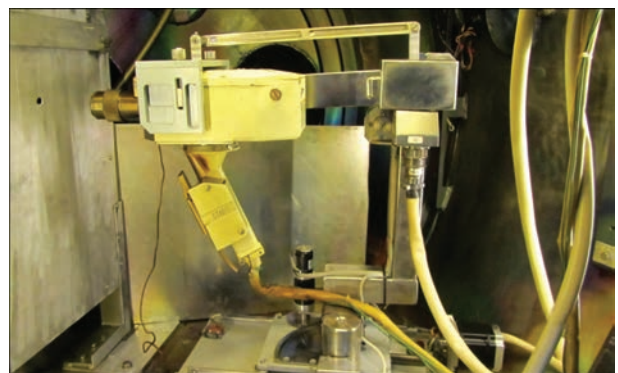


Рис. 2. Маніпулятор з ручною електронно-променевою гарматою, що розташована в камері

ти в космосі аргонодугове зварювання неплавким електродом. Глибокий вакуум може вплинути і на фізико-хімічні процеси, що відбуваються при зварюванні плавленням, особливо при наявності порівняно великих об'ємів рідкого металу.

Разом з тим, для низки способів зварювання наявність глибокого вакууму в космосі виявиться дуже корисним. До них належать електронно-променеве, дифузійне, холодне зварювання, а також зварювання вибухом. Якщо при перших трьох способах глибокий вакуум сприяє створенню найкращих умов для власне процесу зварювання, то при вибуху вакуум виключає можливість утворення вибухової хвилі, що є дуже важливим для безпеки проведення зварювальних робіт.

Рух околосезною орбітою з висотою приблизно 300 км супроводжується частою зміною дня та ночі — за кожні 90 хв. польоту 45 хв. людина знаходиться в темряві. Великої актуальності набуває також адаптація людини до сонячних променів, яскравість яких подвоюється. З'являється необхідність у створенні штучного освітлення робочого місця зварника-космонавта.

Суттєвий вплив на характер протікання процесів зварювання та якість зварних з'єднань можуть надавати коливання температури на околосезних орбітах у межах $-100...+120$ °С і на поверхні Міся-

ця в межах $-150...+130$ °С. Це обов'язково потрібно враховувати при виборі способу та розробці технології зварювання.

Мабуть, для більшості способів зварювання, які реально будуть застосовані в космосі, можна не враховувати корпускулярну радіацію, дію магнітного та електричного полів і електромагнітного випромінювання.

Крім сказаного вище, до зварювального обладнання, що придатне до використання в космосі, повинно бути висунуто ряд спеціальних вимог: мінімальна вага; мала енергоємність; висока надійність; простота використання та управління; безпека.

Перейдемо до розгляду різних способів зварювання та різання, які можуть бути застосовані в космосі.

Способи зварювання та різання, які можуть бути використані в космосі. Електронно-променеве зварювання. Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) — спосіб зварювання, який все більше розповсюджується на Землі, у том числі і при виробництві ракет, ракетних двигунів і космічних кораблів. Якщо на Землі для проведення ЕПЗ зварювані конструкції необхідно розміщати у вакуумних камерах, то в космосі існує природний глибокий вакуум, що спрощує застосування цього способу.

Висока концентрація енергії, що притаманна ЕПЗ, також є дуже корисною в космосі, тому що забезпечує мінімальне тепловкладення в зварюваний метал і мінімальну потужність усієї установки. Крім того, таку установку можна використовувати і для різання, тобто вона має дуже важливий для космоса універсалізм.

Дослідження показують, що для виконання робіт зі зварювання та різання в космосі достатньою є потужність 1...3 кВт при прискорюючій напрузі 15...20 кВт. Така установка може живитися електроенергією від бортової мережі космічного корабля. Блок-схему установки для ЕПЗ у космосі для проведення наземних випробувань наведено на рис. 3. Загальний вигляд установки наведено на рис. 4. Апаратура для ЕПЗ та різання в космосі є досить простою та надійною в експлуатації і має цілком задовільні вагові характеристики. ЕПЗ є придатним для з'єднання широкого діапазону металів, включаючи всі, які використовуються на даний час у космічних конструкціях.

Невагомість практично не позначається на процесі ЕПЗ, тому що ванночка рідкого металу має дуже малий об'єм.

Проте невагомість може призвести до випадкового відриву крапель розплавленого металу під час зварювання і особливо різання. Бризки розплавлен-

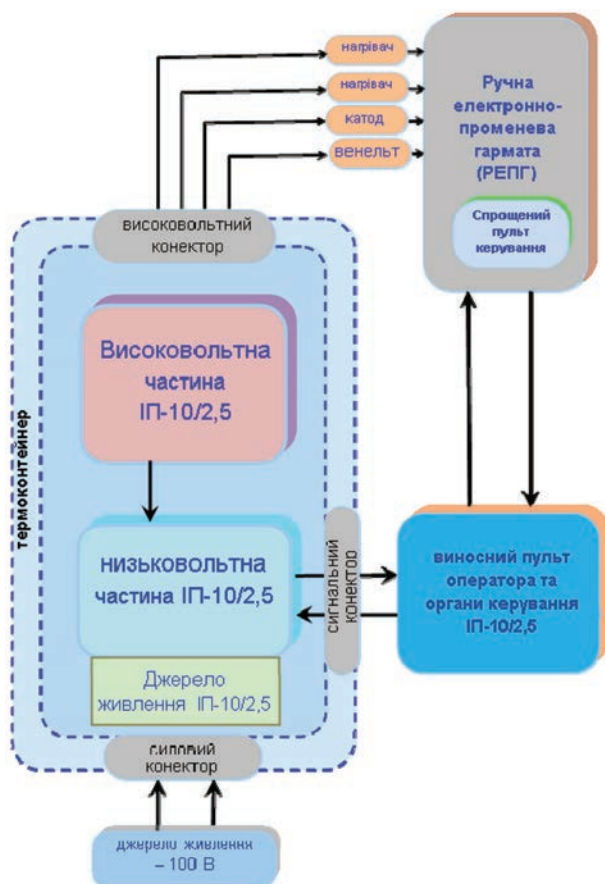


Рис. 3. Блок-схема установки для ЕПЗ в космосі

ного металу здатні руйнувати окремі поверхні. Вони становлять велику небезпеку для скафандра космонавта та для деяких синтетичних матеріалів.

Вакуум полегшує випаровування поверхневих окисних плівок і виключає забруднення металу шва, завдяки чому досягається відсутність дефектів у шві.

Слід враховувати, що ЕПЗ висуває підвищені вимоги до якості збирання, що може викликати деякі труднощі насамперед при виконанні ремонтних робіт. При проведенні ЕПЗ вручну необхідно створити спеціальні пристрої, які унеможливають ураження скафандра космонавта електронним променем. Цього можна досягти електричним і механічним шляхом. Необхідно зазначити, що пост для ЕПЗ легко побудувати так, щоб він мав високу маневрність і космонавт міг працювати однією й тією ж електронною гарматою зовні та всередині космічного корабля (звичайно, за умови розгерметизації останнього).

Аргонодугове зварювання неплавким електродом. Цей широко відомий спосіб зварювання не потребує спеціального опису та пояснень. У космічних умовах він значно поступається ЕПЗ. Концентрація енергії тут значно менша, ніж при ЕПЗ. У результаті різко зростає зона термічного впливу, збільшується ванночка рідкого металу, збільшується небезпека довільного «плавання» у невагомості крапель металу. Витрата аргону навіть при помірних режимах досягає 15...20 л/хв., що приведе до необхідності транспортування в космос спеціальних ємностей з аргонем. Застосування аргону в космічному вакуумі викликано не необхідністю захисту металу шва, а лише стабілізацією дугового розряду. Відносно велика кількість аргону, що витікає з сопла пальника, підвищує реактивність такого інструмента. Це робить ще більш сумнівною доцільність застосування аргонодугового зварювання. Діапазон металів, що зварюються ЕПЗ, є значно ширшим, ніж при аргонодуговому зварюванні. Позначені недоліки роблять аргонодугове зварювання неплавким електродом мало перспективним для застосування в космічних умовах.

Плазмово-дугове зварювання. Цей спосіб зварювання, на відміну від звичайного аргонодугового зварювання, забезпечує значно більшу концентрацію енергії та широкі можливості її регулювання. Витрата аргону тут є значно меншою (у 5...6 разів), ніж при звичайному аргонодуговому зварюванні. Крім цього, плазмово-дуговий пальник є практично однаково придатним для зварювання та різання, що є великою перевагою при його використанні в космічному просторі. При застосуванні помірних режимів (1...3 кВт), мабуть можна обійтися без примусового охолодження



Рис. 4. Загальний вигляд обладнання для відпрацювання електронно-променевих технологічних процесів в наземних умовах

сопла пальника в космічному вакуумі. Це є дуже важливою обставиною. Ще цікавішою для використання в космосі є так звана мікроплазма. Тут за допомогою високочастотного генератора (осцилятора) збуджується допоміжна незалежна дуга між вольфрамовим електродом і мідним соплом. Плазоутворюючим газом є аргон. Сила струму ~ 2 А. При замиканні на зварюваний метал чергова дуга розтягується та збуджується основна дуга між вольфрамовим електродом і металом. Основна дуга, що стискається потоком аргону з 5...7 % водню, має форму голки. При рекомбінації атомів водню на зварюваному металі виділяється додаткова кількість тепла. Струм основної дуги може змінюватися в широкому діапазоні 0,2...20 А. Цей спосіб дає дуже високу концентрацію енергії, що вже порівняно з такою для електронного променя. Голкоподібна мікроплазма дозволяє зварювати метал завтовшки від 0,01 мм і вище. Обладнання для цього способу зварювання значно простіше та дешевше, ніж для ЕПЗ. Цей спосіб є однаково придатним для використання в глибокому космічному вакуумі та всередині космічного корабля (звісно, при виборі безпечної атмосфери в кабіні). Це вигідно відрізняє даний спосіб від ЕПЗ. Суттєвим недоліком мікроплазми є необхідність транспортування в космос аргону і водню. Проте плазмово-дугове зварювання та різання (звичайне та мікро) все ж має деякі перспективи застосування в космічних умовах.

Дугове зварювання плавким електродом. Цей вид зварювання є цікавим для космічних умов. Особливо це стосується спорудження різних зварних конструкцій на інших планетах, а також ремонтних робіт. Тут може бути пред'явлено менш жорсткі вимоги до якості збирання, ніж при ЕПЗ і мікроплазмовому зварюванні. Досліди показали, що в парах металу, що плавиться, можна досягти досить стійкого горіння дуги навіть в умовах

глибокого космічного вакууму. Проте якщо не застосовувати спеціальних заходів, то дуга легко перекидається на струмопідвідні та інші вузли зварювальної головки. Найрадикальнішим є створення умов, що забезпечують чітке відшнуровування стовпа дуги. Ми вже відзначали труднощі, що виникають при керуванні перенесенням металу в дузі в умовах невагомості. Досвід показує, що нормалізації процесу перенесення металу можна досягти двома шляхами. Якщо зварюваний метал і потужність джерела живлення дозволяють застосувати досить «жорсткі» режими зварювання (щільність струму в електроді не менше за 100 А/мм^2), то процес перенесення металу є цілком задовільним. У цих умовах електродинамічне зусилля, що впливає на краплю металу, яка знаходиться на кінці електрода, цілком достатньо для відриву краплі при відсутності сили тяжіння та забезпечення дрібнокрапельного перенесення металу. Якщо ж необхідно застосувати малий струм дуги, то електродинамічне зусилля, що створюється власне струмом дуги, виявляється недостатнім для відриву крапель з кінця електрода. Тут для керування процесом перенесення металу можна з успіхом застосувати імпульсно-дугове зварювання, тобто накладення на основний струм зварювальної дуги короткочасних імпульсів струму, що забезпечують створення імпульсів електродинамічної сили, яка відриває краплі з кінця електрода. Генератори імпульсів (ГІ) підключаються паралельно до основного джерела живлення зварювальної дуги. Створення ГІ для космічних умов не становить труднощів, тому що тут застосовуються порівняно малі зварювальні струми ($40\text{...}80 \text{ А}$). При цьому амплітуда струму в імпульсі повинна дорівнювати $250\text{...}500 \text{ А}$, а його тривалість — $1,5\text{...}2 \text{ мс}$. Слід пам'ятати про необхідність прийняття спеціальних заходів, що виключають можливість «холодного зварювання» електродним дротом з подаючими роликками та струмопідвідним пристроєм зварювальної головки в глибокому вакуумі. Крім того, при конструюванні механізмів зварювальної головки треба задовольнити всі вимоги, що висувуються до механізмів, які працюють у космосі. Мабуть, дугове зварювання плавким електродом може знайти деяке застосування в космічних умовах, особливо при освоєнні інших планет.

Точкове зварювання. Точкове зварювання може застосовуватись в космосі для прихватування різних деталей при збиранні конструкцій на орбіті, а також на Місяці та на інших планетах. Точкове зварювання може бути використане і при ремонтних роботах, наприклад, для прихватування латок при метеоритних пробоях космічних кораблів.

Особливо перспективним є точкове зварювання у поєднанні з герметизуючими пастами і клеями, що пристосовані для роботи в космічному вакуумі. Точкові кліщі можуть бути виконані із вбудованими трансформаторами, якщо останні живляться струмами підвищеної частоти ($500\text{...}1000 \text{ Гц}$). У цьому випадку необхідно застосовувати трансформатор потужністю 1 кВт . Космічні умови не впливають на процес точкового зварювання. У цьому випадку невагомість впливає лише на умови роботи людини. Мабуть точкове зварювання знайде застосування в космосі. Живлення кліщів струмами підвищеної частоти не становить труднощів, тому що ЕПЗ потребує перетворення постійного струму від бортової мережі або автономних акумуляторів у змінний струм і наступне підвищення напруги змінного струму. Отриманий на виході інвертора змінний струм може бути використаний для живлення кліщів для точкового зварювання.

Холодне зварювання. Великий об'єм і складність електричного та електронного обладнання космічного корабля збільшує ймовірність відмови його елементів під час польоту. Пошук місць ушкоджень і ремонт електроланцюга є однією з типових операцій під час польоту. Мабуть, обрив дротів можна буде у певних випадках усувати за допомогою холодного зварювання. Для холодного зварювання дротів можуть бути використані кліщі, аналогічні тим, що застосовуються на Землі. Цілком очевидно, що невагомість не впливає на якість з'єднання, що виконано холодним зварюванням. Було проведено ряд експериментів для детального вивчення холодного зварювання. Зварювані деталі очищали дротяною щіткою та виконували холодне зварювання у вакуумі 10^{-13} тор, що відповідає навколоземним орбітам. Було отримано найкращі результати при холодному зварюванні міді, алюмінію та золота. Деяко гірші результати було отримано при холодному зварюванні сталі та титану. Головною перевагою холодного зварювання є можливість з'єднання металів без нагріву, що призводить до знеміцнення, а також відсутність досить важких джерел нагріву. Цікавим є холодне зварювання в космосі з використанням ультразвукових коливань і іонних пучків. Холодне зварювання в певних випадках може успішно доповнити способи зварювання плавленням, які будуть застосовуватись у космосі.

Дифузійне зварювання. Дифузійне зварювання також може бути успішно виконано в космічному вакуумі. Підвищена дифузія речовин у глибокому космічному вакуумі сприяє очищенню поверхонь металів від забруднень. Це дуже важливо для отримання якісних зварних з'єднань. Недоліком ди-

фузійного зварювання в космосі є необхідність нагріву, тобто необхідність у наявності відповідних джерел нагріву. Крім того, нагрів, що застосовується при дифузійному зварюванні, приведе до певного знеміцнення металу в зоні зварювання. Ми вважаємо, що класичне дифузійне зварювання не має перспектив застосування в космосі. Поряд з тим, певний інтерес для космоса представляє тверде паяння і так зване паяння з різними прошарками.

Зварювання тертям. Цей вид зварювання потребує наявності елементів, що обертаються, які створюють достатню для отримання зварного з'єднання кількість тепла. Вакуум і невагомість не матимуть шкідливого впливу на процес зварювання тертям. Проте створення інструмента з механізмом обертання пов'язано з великими труднощами внаслідок необхідності компенсації реактивного зусилля. Мабуть, зварювання тертям не отримає застосування в космосі.

Зварювання та різання вибухом. Ми вже вказували, що глибокий космічний вакуум сприяє хорошему очищенню зварюваних поверхонь. Зварювання вибухом дозволяє отримати досить міцні накладні з'єднання однорідних і разнорідних металів. Час зварювання вибухом може змінюватись у широких межах – від однієї мікросекунди до декількох секунд або навіть десятків секунд. Компактність і невелика вага вибухівки також є перевагою способу. Цей метод, мабуть, можливо використовувати і для збирання з наступним зварюванням. Труднощі застосування зварювання вибухом полягають в правильному підборі величини вибухового заряду та місця встановлення заряду. Ці труднощі можуть стати дуже суттєвими в космічних умовах. Великі перспективи має застосування різання вибухом. У цьому випадку найперспективнішим є застосування лінійних зарядів, що забезпечують безуламкове різання. Заряди повинні бути закладені в заданих місцях ще на Землі. При виконанні зварювання та різання вибухом на космічному кораблі треба весь час компенсувати виникаючі при вибуху реактивні сили, що порушують траєкторію польоту корабля. Це може бути великими труднощами, що знецінюють ефективність застосування цього дешевого та надійного способу зварювання та різання в космосі. Сказане не стосується робіт зі зварювання та різання вибухом на інших планетах. Ми вважаємо, що зварювання та безуламкове різання вибухом отримає суттєвий розвиток в космосі.

Зварювання з використанням сонячної енергії. У космосі може бути використана зварювальна геліоустановка, що концентрує світлову енергію Сонця на зварюваний метал. Можлива оптична схе-

ма установки описується наступним чином. Світло падає на параболічне дзеркало великого діаметру (концентратор) і збирається в його фокусі. Окулярне дзеркало розміщується таким чином, щоб його фокус і фокус концентратора співпадали. При цьому промені від окулярного дзеркала будуть йти паралельним пучком. Для їх виведення у центрі концентратора робиться отвір. Два плоских дзеркала спрямовують промені від окулярного дзеркала на лінзу, у фокусі якої розміщується зварюваний зразок. Дзеркала повинні весь час автоматично розміщуватись так, щоб при всіх переміщеннях концентратора та лінзи їх оптичні осі співпадали після заломлення на концентраторі та дзеркалах. Для того, щоб отримати потужність геліоустановки 3 кВт, потрібно застосувати концентратор діаметром 200 см. При цьому загальна вага всіх оптичних деталей складає ~15...20 кг. Ще стільки ж будуть важити механічні вузли установки. Розглянута установка повинна мати досить складну оптичну схему, щоб забезпечити мобільність лінзи при зварюванні. Наявність великої кількості відбиваючих елементів знижує потужність установки та щільність енергії у плямі. Для установки необхідно мати джерело електроенергії, яке забезпечує живлення системи стеження за Сонцем і системи автоматичного переміщення плоских дзеркал. Ми вважаємо, що геліоустановки не отримають розповсюдження для зварювання на орбіті внаслідок своєї громіздкості та малої мобільності. Разом з тим, необхідно серйозно опрацювати питання про доцільність застосування геліоустановок для плавлення особливо чистих тугоплавких металів та їх сплавів у космічних умовах.

На основі викладеного перелічимо способи зварювання та різання, які, на нашу думку, можуть ефективно використовуватись в космосі: — ЕПЗ та різання; плазменно-дугове зварювання та різання, включаючи застосування голкоподібної мікроплазми; дугове зварювання плавким електродом малого діаметра; точкове зварювання малогабаритними кліщами із вбудованими трансформаторами; холодне зварювання; зварювання та різання вибухом.

Деякі результати дослідної перевірки різних способів зварювання та різання в умовах, що імітують космічні. Для проведення технологічних випробувань процесів зварювання та різання різних металів і сплавів в умовах, що імітують космічний простір, було розроблено комплекс обладнання. Це обладнання дозволило виконати процеси зварювання у вакуумі при динамічній невагомості.

Спеціальна вакуумна система забезпечила створення та підтримку в робочій камері зварювальної установки необхідного розрідження без

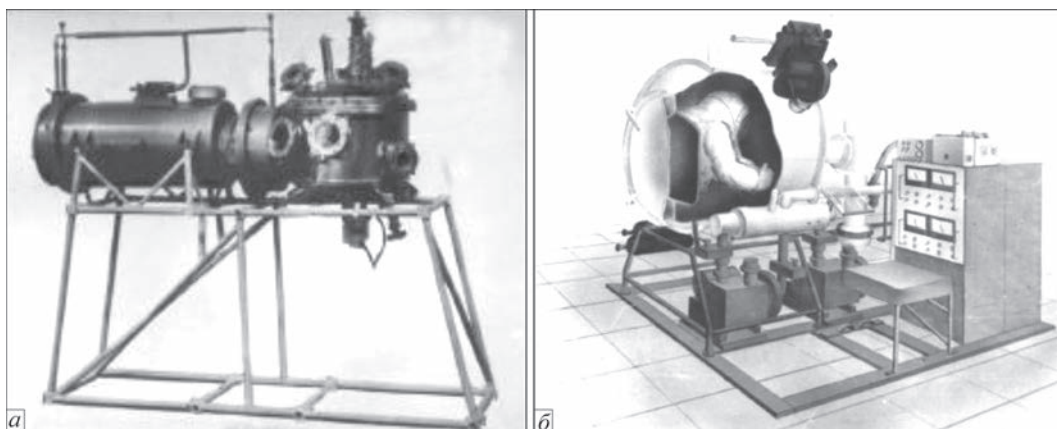


Рис. 5. Обладнання для проведення досліджень процесів зварювання в умовах, що імітують космічні: *а* — загальний вигляд універсального вакуумно-температурного стенду для вивчення зварювальних процесів; *б* — стенд-тренажер для зварювальних робіт

парів мастила. Основу цієї системи склав спеціальний високовакуумний сорбційний насос.

Дослідні зварювання проводились у вакуумній камері з нержавіючої сталі об'ємом 100 л. Всередині камери розміщено поворотний стіл з укріпленими на ньому зразками. Зразки виготовляються в вигляді кілець, окремі сегменти яких можуть бути зроблені з різних металів. На верхній кришці камери встановлювались пристрої для зварювання різними способами. У корпусі камери є три люки, на фланцях яких встановлено три кінокамери з частотою кінокадрів 24 в секунду і 5000 в секунду.

У процесі проведення досліджень знімалися і записувалися наступні параметри: величина ва-

кууму в камері, величина перенавантажень, електричні режими зварювання та різання, час.

Загальний вигляд установки для вивчення зварювальних процесів в умовах, що імітують космічні, наведено на рис. 5, *а*. Стенд-тренажер для зварювальних робіт в умовах космосу наведено на рис. 5, *б*. Робочу камеру пристосовано для установки різних джерел нагріву для виконання наступних способів зварювання: електронно-променевого; плазмово-дугового; дугового плавким електродом.

Установки було змонтовано в летаючій лабораторії (рис. 6, 7), де забезпечувалась динамічна невагомість (0...0,15 g) при польоті літака за кривою Кеплера (рис. 8). Слід зазначити, що при переході від горизонтального польоту, при якому перенавантаження дорівнюють одиниці, до режиму невагомісті, при якому перенавантаження дорівнюють нулю, а потім знову до горизонтального польоту, мав місце перехідний процес, при якому перенавантаження склали 2,2...2,5 g. У цих перехідних режимах також здійснювались зварювання та зйомка.

Під час польоту кожна установка обслуговувалась двома операторами-зварниками. Після польоту виконувались огляд і обробка зварених зразків і осцилограм, продивлялися кадри кінозйомки. У

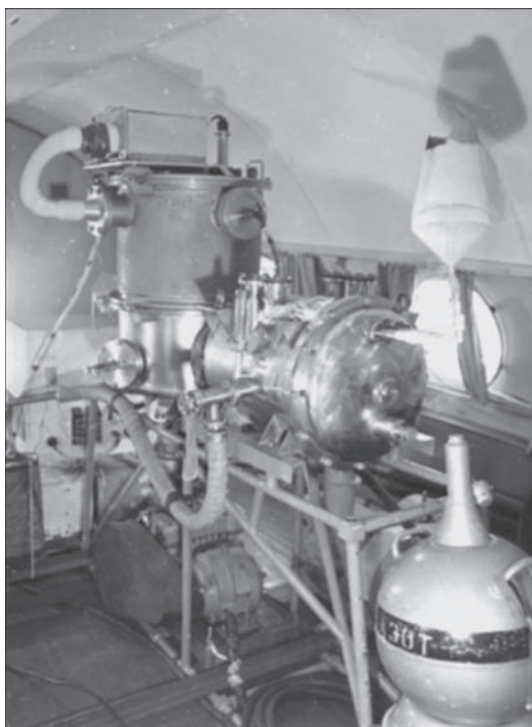


Рис. 6. Установки для проведення робіт з ЕПЗ, що змонтовано в летаючій лабораторії

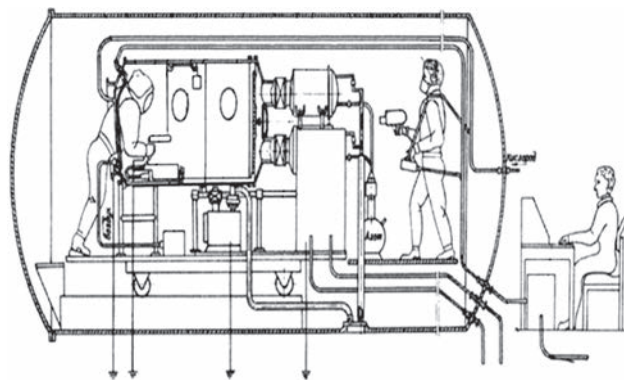


Рис. 7. Схема розміщення обладнання та зварників-дослідників у летаючій лабораторії при проведенні експериментів з ЕПЗ

результаті спостережень у польоті і записів у бортовому журналі, а також аналізу отриманих матеріалів вносились необхідні зміни в програму наступного польоту.

Метою проведених випробувань було: дослідна перевірка можливості проведення різних способів зварювання та різання металів в умовах невагомості та вакууму; перевірка технологічної надійності та роботоздатності власне способу зварювання та розробленої для його виконання малогабаритної апаратури; металографічні дослідження зварюваних зразків; дослідження особливостей формування зварних швів, утворення зварювальної ванни та перенесення металу в процесі зварювання в умовах невагомості; дослідження впливу невагомості на процес виділення газів з рідкого металу зварювальної ванни.

Наведемо короткі результати виконаних досліджень.

Електронно-променево зварювання та різання.

Зварювання та різання різних металів виконувалось при постійній потужності пучка 1 кВт, струмі променя 70 А і швидкості зварювання (різання) 30 м/год. За час перебування в невагомості (25...30 с) зварювався або розрізався один зразок. Перед польотом на Землі виконувалось зварювання контрольного зразка. При візуальному спостереженні за ходом ЕПЗ та різання в умовах невагомості та перенавантажень не встановлено зовнішніх відмінностей процесу у порівнянні зі зварюванням у звичайних земних умовах. На рис. 9 наведено мікроструктури зварних з'єднань (за відбортовкою) з нержавіючої сталі типу 12Х18Н9Т, які виконано у звичайних умовах і в не-

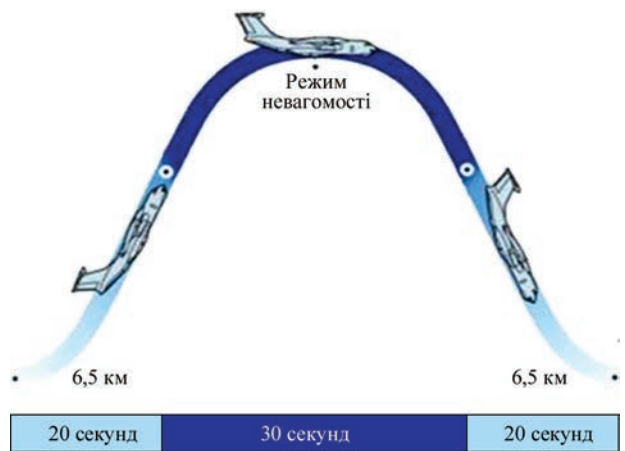


Рис. 8. Політ літаючої лабораторії на базі літака ІЛ-76МДК по параболі Кеплера для створення умов короткочасної мікрогравітації

вагомості. У результаті металографічних досліджень встановлено повну ідентичність формі шва та величини проплавлення металу як у звичайних умовах, так і в невагомості.

На рис. 10 наведено зварні стикові з'єднання з різних сплавів, які отримано в умовах невагомості у відкритому космосі.

На зразках з алюмінієвого сплаву АМГ-6, що зварені в невагомості, помічено більшу пористість у порівнянні зі швом, який виконано у звичайних умовах, що, ймовірно, пояснюється утрудненим виділенням бульбашок газу з рідкого металу зварювальної ванни.

Процес електронно-променевого різання сталі 12Х18Н9Т у невагомості та у звичайних умовах не має суттєвих відмінностей (рис. 11). При різанні

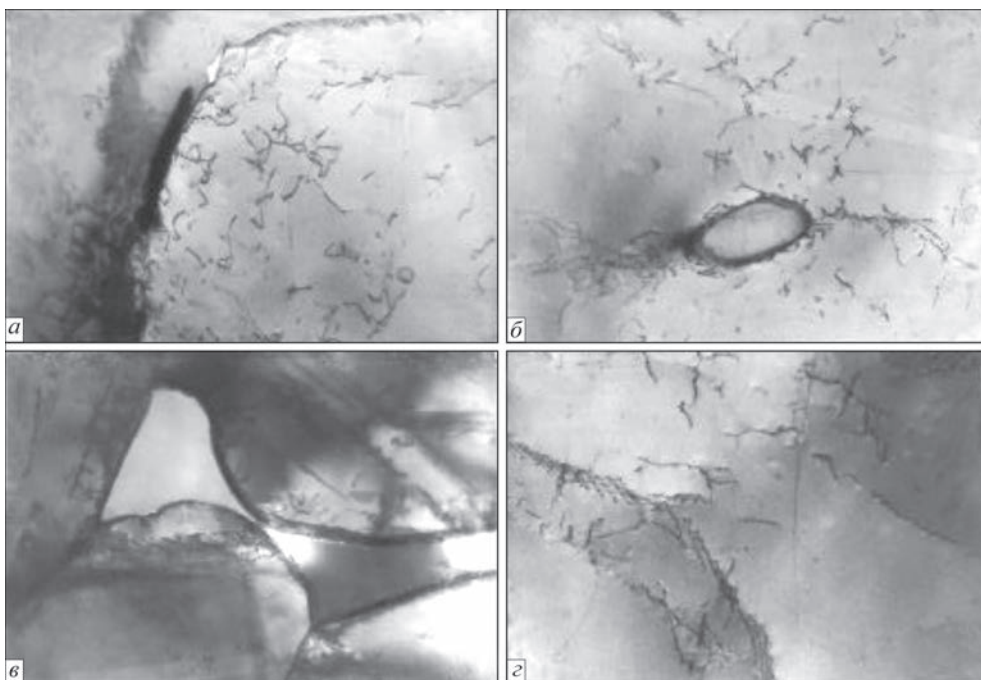


Рис. 9. Мікроструктури зварних з'єднань з нержавіючої сталі типу 12Х18Н9Т, які виконано у звичайних умовах (а, б) і в невагомості (в, г) (отримані на електронному мікроскопі)

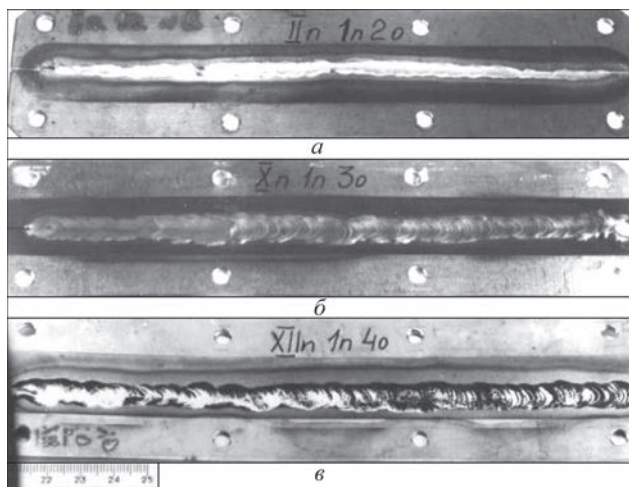


Рис. 10. Приклади з'єднань, які отримано в умовах невагомості у відкритому космосі: *a* — нержавіюча сталь, $\delta = 1$ мм, пайка ПСД-72; *b* — нержавіюча сталь, $\delta = 2$ мм, стик без проміжку з подачею присадного дроту; *c* — титан, $\delta = 1$ мм, накладне з'єднання без подачі присадного дроту

сплаву АМГ-6 на одній зі сторін різу було отримано неперервний гладкий наплив металу.

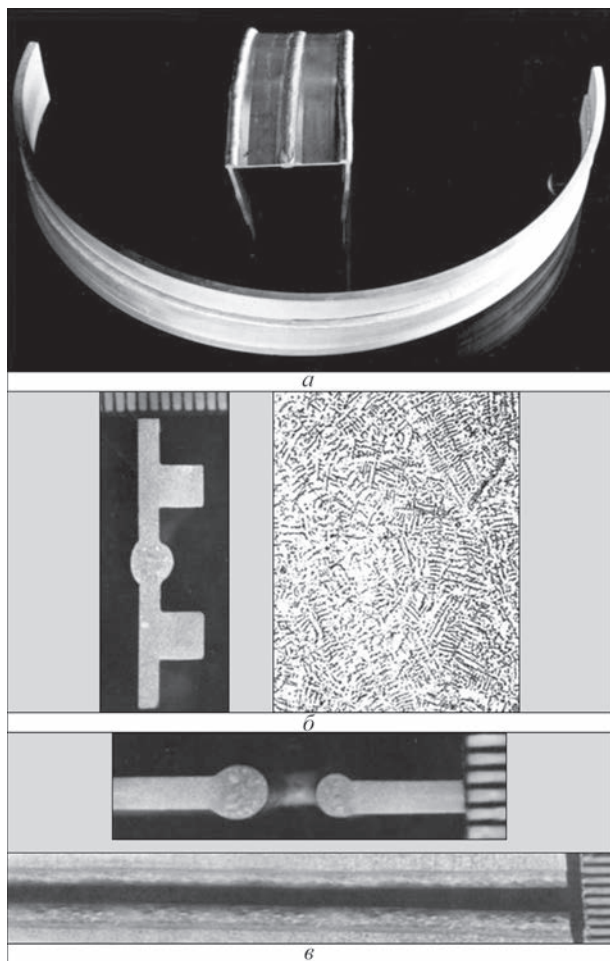


Рис. 11. Макро- та мікроструктура зварних з'єднань та різів різних металів, які виконано електронним променем у невагомості: *a* — зварні з'єднання з перекриттям з титанового сплаву ВТ1; *b* — макро- та мікроструктура зварних швів зі сталі Х18Н10Т; *c* — макроструктура та зовнішній вигляд зразків з алюмінієвого сплаву АМГ6 після різання

На основі проведених дослідів з ЕПЗ встановлено, що цей процес дозволяє в умовах короткочасної невагомості отримати якісні зварні з'єднання різних металів і сплавів. Процес електронно-променевого різання також протікає без помітних змін у порівнянні зі звичайними земними умовами. Необхідно в подальшому провести дослідження з ЕПЗ і різання в глибокому вакуумі ($10^{-10} \dots 10^{-12}$ мм рт. ст), коли можливе порушення компенсації просторового заряду в пучку з-за нестачі позитивних іонів газу. Розроблена малогабаритна апаратура для ЕПЗ і різання може бути використана в космічних умовах.

Випаровування металу з розливу за допомогою електронно-променевого нагріву. Випаровування металів та інших речовин у вакуумі широко застосовується для отримання плівок і покриттів. Перспективним є зварювання напиленням, що полягає у спрямованому інтенсивному випаровуванні металу замість з'єднання деталей і вузлів. Цей процес, мабуть, може знайти застосування для ремонтних робіт у космосі.

Найбільший інтерес представляла перевірка поведінки розплавленого металу в невагомості. Крім того, необхідно було перевірити можливість отримання напилених шарів на різних підкладках. Фізико-хімічні властивості напилених шарів залежать від ступеня розрідження, температури підкладки, властивостей матеріалу, що напилюється, кута осадження атомів на підкладку та низки інших факторів.

Враховуючи обмеження ваги установки, на якій проводився дослід, було обрано тігельний спосіб випаровування. При цьому можна створити досить велику ванну розплаву з розвиненою поверхнею, забезпечуючи тим самим вищу швидкість випаровування та візуальний контроль можливих змін у поведінці рідкого металу.

Дослід проводився за схемою, наведеною на рис. 12. Використовувалась зварювальна електронна гармата, що формувала пучок потужністю 1 кВт ($U_{\text{приск.}} = 14 \dots 15$ кВ). Тігель з металом, що напилюється, у кількості 10...20 г укріплювався на зварювальному столі. Позитивний потенціал відносно катода гармати подавався на масу розплаву через молібденовий струмопідвод $d = 4$ мм, який вставлено в дно тігля по його осі. Тігель було виготовлено з високотемпературної кераміки типу БНЦ. З тігля в процесі дослідів випаровувались алюміній та мідь.

При розплавленні в умовах горизонтального польоту і перенавантажень ($g_n \geq g$) дякуючи хорошому змочуванню матеріалу тігля розплавленим алюмінієм

поверхня розплаву має вогнутий меніск. Перед самим входом у стан невагомості ($g_n = 0 \pm 0,15 g$) джерело нагріву було вимкнено. У стані невагомості рідкий алюміній розподілювався по поверхні тігля, створюючи воронку (рис. 12).

До перенавантажень розплавлена мідь не змочувала тігель. У момент появи перенавантажень відбулося невелике зниження меніску. При настанні стану невагомості розплав піднявся з тігля, набув форми кулі та почав повільно підніматися вгору, обійшовши анод гармати. При виході зі стану невагомості розплавлений метал прилип до аноду гармати. При перенавантаженні $g_n \approx 0,15g$ частина металу, що знаходилась ще в рідкому стані, впала на зварювальний стол установки, а потім і в тігель. Напилення проводилось на підкладці з алюмінія, лавсанової і поліетиленерофтолатної плівки. Послідовно, з інтервалом у 10 хв., на вказані підкладки розпилялися алюміній, мідь і знову алюміній.

Проведені дослідження дозволили зробити наступні висновки. Пари алюмінія та міді можуть успішно конденсуватися в умовах невагомості на різні підкладки; поведінка розплавлених міді та алюмінію в умовах невагомості викликає необхідність проведення подальших досліджень, розробки спеціального обладнання та вибору оптимального способу випаровування. Отримано задовільне зчеплення металів, що напилюються, з підкладками з лавсану та поліетиленерофтолатної плівки. Відсутність підігріву підкладки з алюмінієвого сплаву АМГ-6 не дозволила отримати задовільне зчеплення конденсованої плівки з підкладкою. Показано принципову можливість виконання зварювання напиленням металу, що випаровується, при умові відповідного підігріву поверхні металу, що зварюється.

Плазмово-дугове зварювання та різання. Проведення дослідів мало на меті наступне: встановити вплив невагомості на робочий режим плазмової дуги в штучному вакуумі; визначити вплив зміни сили тяжіння на поведінку ванни рідкого металу і формування зварного шва; вивчити умови газовиділення та структурні зміни в металі шва; перевірити роботоздатність зварювального обладнання та технологічну надійність процесу.

Зварювальний пальник, що застосовувався при дослідях, наведено на рис. 13. Катодна частина пальника призначена для кріплення катоду до вакуумного вводу, а також для ізоляції катодної області дугового розряду від вакуумованого об'єму. Пальник працює без водяного або будь-якого іншого охолодження. Натікач являє собою пристрій для точного дозування плазموутворюючого газу та складається з запірної клапану і дозуючого венти-

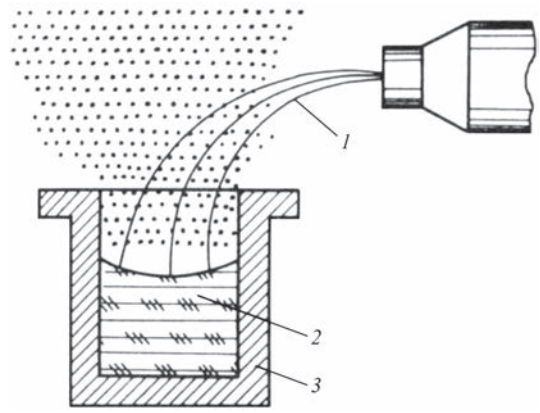


Рис. 12. Технологічний процес нанесення покриття випаровуванням у вакуумі зі скануванням електронного пучка за заданою програмою: 1 — пучок електронів; 2 — розплавлений метал; 3 — тігель

ля. За допомогою натікача в зону дуги подається аргон у кількості 0,001...0,005 л/хв. Підпалювач-пристрій для збудження дугового розряду у вакуумі являє собою генератор уніполярних імпульсів високої напруги з крутим фронтом імпульсу. Джерелом живлення дуги є акумуляторна батарея.

Для проведення дослідів використовувались колоподібні зразки з наступними типами зварних з'єднань: стикові, відбортовка, накладні. Крім того, застосовувались спеціальні зразки для різання. Зразки завтовшки 1 мм зі стиковим і накладними з'єднаннями виготовлялись з титанового сплаву ВТ-1, а з відбортовкою — з нержавіючої сталі 12Х18Н9Т. Зварювання кожного зразка відбувалось таким чином, що на ньому були ділянки зварного шва, які відповідали всім еволюціям польоту.

На підставі проведених дослідів встановлено наступне: в умовах динамічної невагомості можна отримати цілком якісні з'єднання всіх типів при відсутності проміжків у випадку накладного з'єднання та при наявності проміжків, що не перевищують 10 % товщини зварюваного металу для бортового і стикового з'єднань. У всіх випадках режими зварювання були наступними: $I_d = 43...50 A$, $U_d = 26...27 V$.

При номінальній довжині дуги 5 мм її коливання на $\pm 20\%$ помітно не впливають на якість зварного з'єднання. Витрата плазموутворюючого газу повинна точно дозуватися, і його витікання повинно бути стабільним.

Потужності плазмової дуги в 1 кВт виявилось недостатньо, щоб задовільно виконати різання сталі 12Х18Н9Т завтовшки 1 мм. Вдалося задовільно розрізати титан завтовшки 1 мм; проте поверхня різі має напливи, що утворюються незалежно від величини сили тяжіння.

При зварюванні плазмовою дугою розміри зварювальної ванночки настільки малі, що формування



Рис. 13. Ручний інструмент для плазмово-дугового зварювання та різання у космосі

зварних швів не залежить від сил гравітації та визначається в основному силами поверхневого натягу.

У зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі пори відсутні. У з'єднаннях зі сплаву ВТ-1 мали місце пори, в основному по лінії сплавлення. Мабуть, для зварювання в космосі потрібно пред'являти підвищені вимоги до чистоти основного металу.

Природний глибокий вакуум космічного простору може суттєво впливати на характер запалення дуги, порушити стійкість її горіння та фокусування анодної плями. Ці фактори в поєднанні з тривалим впливом невагомості можуть значно впливати на характер формування зварних швів та їх фізико-механічні властивості. Тому остаточний висновок про придатність і області застосування плазмово-дугового зварювання та різання в космосі можна буде зробити тільки після проведення натурних випробувань.

Дугове зварювання плавким електродом. Досліди з дугового зварювання плавким електродом в умовах динамічної невагомості проводились в камері з контролюємою атмосферою та у вакуумній камері. Досліджувався вплив сили тяжіння на: процес утворення краплі металу на торці електрода; формування



Рис. 14. Зварювальний інструмент для дугового зварювання плавким електродом

зварювальної ванни; умови виділення газів зі зварювальної ванни; швидкість плавлення електрода.

У першій серії дослідів герметична камера заповнювалась аргоном. Застосування аргону в якості іонізуємого та захисного газу має великий науковий і практичний інтерес, тому що аргон може бути використаний при виконанні зварювальних робіт всередині космічних кораблів, а також і безпосередньо в космосі при використанні місцевих накидних камер, що заповнені аргоном.

Загальний вигляд зварювального інструмента для дугового зварювання плавким електродом наведено на рис. 14.

Зварювались зразки з нержавіючої сталі марки 12Х18Н9Т, алюмінієво-магнієвого сплаву АМГ-6 і титанового сплаву ВТ-1. Товщина зразків 1 мм, з'єднання: стикові, накладні, відбортовка. Проводилось також наплавлення валиків на пластинки. Матеріал електродного дроту відповідав матеріалу зразків, діаметр дроту 1 мм. Живлення дуги проводилось від акумуляторної батареї, у зварювальний ланцюг вводився дросель з індуктивністю 0,3 мГн. Полярність — зворотня. Зміна струму дуги відбувалась шляхом зміни швидкості подачі дроту, напруги на дузі — зміною напруги холостого ходу акумуляторної батареї. У всіх випадках потужність дуги не перевищувала 1 кВт.

Процес плавлення та перенесення електродного металу, а також поведінки зварювальної ванни в умовах невагомості, нормальної сили тяжіння та перенавантажень фільмувався швидкісною кінокамерою СКС-1М і кінокамерою АКС-2. Режими зварювання осцилографувалися синхронно з кінозйомкою.

Обрані режими зварювання перевірялись безпосередньо перед кожним польотом у летаючій лабораторії на Землі, а потім вже відтворювалися при польотах в умовах перенавантажень і невагомості.

Вивчення кіноплівок і зварних зразків показало, що стан динамічної невагомості порушує співвідношення сил, що діють на краплі розплавленого металу та рідку зварювальну ванну, в результаті чого змінюється характер плавлення та перенесення електродного металу і формування зварювальної ванни. Протягом 10 польотів було зварено 36 зразків і зафільмовано більше ніж 500 м плівки швидкісною кінокамерою та близько 1000 м плівки камерою АКС-2.

Особливості плавлення та перенесення металу в невагомості. Розрахунки доводять, що для сталюого електрода діаметром 1 мм в умовах нормальної сили тяжіння, сила струму, при якій зусилля пінч-ефекту починає сприяти відриву краплі, дорівнює 32 А. Дія електромагнітної сили проявляється повною мірою і в умовах невагомості. Реактивний тиск парів металу при розташуванні

активної плями строго по осі електрода буде сприяти утриманню краплі на торці електрода. Якщо розташування активної плями зміщується з осі, то може виникнути тангенційна сила, що сприяє зрізанню краплі. У випадку зварювання на зворотній полярності в аргоні при нормальній силі тяжіння реактивний тиск парів металу невеликий.

Дослідження процесу кипіння рідин в умовах зниженої гравітації показали, що швидкість підйому бульбашок при бульбашковому кипінні різко зменшується при зниженні сили тяжіння, а їх діаметр зростає пропорційно до інтенсивності гравітаційного поля у ступені $1/3,5$. Характер плівкового та бульбашкового кипіння при невагомості є однаковим. Впливом на процес перенесення металу реактивного тиску паров металу та газових потоків у наших дослідях можна знехтувати.

Зі зменшенням сили тяжіння все більше значення набуває сила поверхневого натягнення та сили змочування. При цьому все більший вплив на характер плавлення та перенесення металу надають різні випадкові імпульси. Обробка результатів дослідів показала, що після запалювання дуги починається оплавлення електрода, на його торці утворюється крапля рідкого металу. Розмір краплі в основному визначається співвідношенням сили поверхневого натягнення та електромагнітної сили (у випадку вільного зростання краплі), а також довжиною дугового проміжка (утруднене зростання краплі).

При невеликих значеннях величини струму крапля зростає до дуже великих розмірів, що у декілька разів перевищують діаметр електрода (рис. 15). На Землі краплі таких розмірів на кінці електрода отримати неможливо. Форма крапель, як правило, є сферичною, що свідчить про відсутність будь-яких інших сил. Випадкові імпульси призводять до контакту краплі з виробом, у результаті різко зростає сила струму, зростає електромагнітне зусилля і крапля відривається. При відсутності випадкових впливів крапля знаходиться на кінці електрода тривалий час і досягає дуже великих розмірів. В окремих дослідях протягом всього періоду зйомки, що тривала більше за 3 с, не спостерігалось жодного переходу краплі. У таблиці наведено дані про розміри крапель, що вільно зростають на кінці електрода в невагомості, для матеріалів з різним поверхневим натягненням.

На кіноплівці видно інтенсивне обертання краплі навколо осі, що є перпендикулярною або нахиленою до осі електрода. Зі зростанням краплі знижується щільність струму в активній плямі на електроді та стійкість дугового розряду. Плями дуги безладно переміщуються поверхнею краплі

Матеріал	Струм дуги, А	Максимальний розмір вільно-зростаючої краплі, мм
12Х18К9Т	50	6...8
ВТ-1	60	4...5
АМГ-6	60	3...4

та ванни, глибина проплавлення основного металу зменшується, формування шва погіршується.

Збільшення сили струму за рахунок збільшення швидкості подачі електрода веде до скорочення дугового проміжку, вільне зростання краплі утруднюється, розмір крапель зменшується. Покращуючи формування шва, перенесення металу відбувається з короткими замиканнями дугового проміжка.

Зі зростанням струму дуги частота переходу крапель зростає. Так, наприклад, при зварюванні нержавіючої сталі збільшення струму від 50 до 70 А призводить до зростання частоти від 15 до 33 крапель за секунду.

Зі збільшенням сили тяжіння (на ділянках перенавантажень) підвищується частота переходу крапель електродного металу, зменшується їх розмір, стійкість горіння дуги при цьому не порушується.

Вплив невагомості на процес утворення та перенесення крапель електродного металу при зварюванні сплаву АМГ-6 має той же характер, що і при зварюванні нержавіючої сталі. Крапля весь час займає положення, що є співвісним з електродом, та має форму кулі. Після відриву краплі на кінці електрода практично не залишається рідкого металу. Збільшення сили тяжіння призводило до зростання частоти переходу крапель рідкого металу в зварювальну ванну.

Зварювання сплаву ВТ-1 проводилось при великих силах струму. Тому розмір крапель мало відрізняється від звичайних для земних умов. Перехід крапель через дуговий проміжок відбувається під час коротких замикань, чому в значній мірі сприяє вельми рухома зварювальна ванна. Як

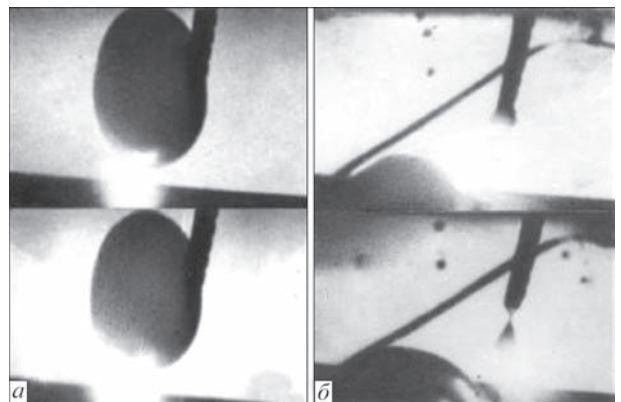


Рис. 15. Перенесення електродного металу при дуговому зварюванні електродом, що плавиться в невагомості (захисний газ аргон), зварювальний струм 50 А, напруга дуги 15 В, швидкість подачі дроту 180 м/год, діаметр електрода 0,8 мм): а — неконтрольоване, б — контрольоване

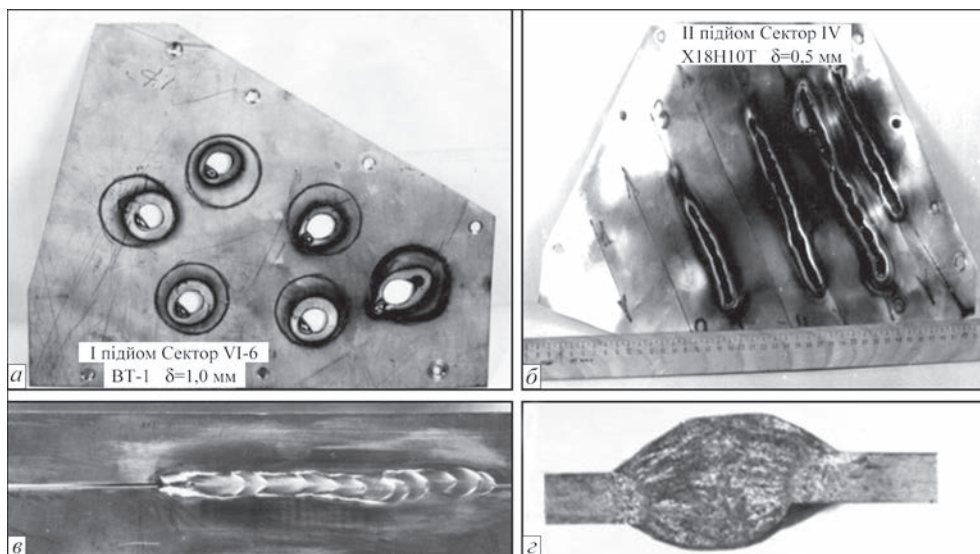


Рис. 16. Комплексні випробування в барокамері зразків з різних металів, які отримані електронно-променевим зварюванням: *a* — пропал, сплав ВТ-1, $\delta = 1,0$ мм; *b* — різання, нержавіюча сталь X18H10T, $\delta = 0,5$ мм; *c* — зовнішній вигляд зварного шва з нержавіючої сталі X18H10T; *d* — макрошліф зварного з'єднання з нержавіючої сталі X18H10T

правило, спостерігається лише частковий перехід електродного металу у ванну, більша його частина залишається на електроді, що викликає серію коротких замикань.

Вплив коливань електроду. В умовах невагомості при зварюванні на невеликих струмах випадкові імпульси значно впливають на характер перенесення металу та формування швів. З метою управління перенесенням металу було проведено дослідження впливу коливань електроду на перенесення металу. Коливання впоперек шва з амплітудою 1,5...2 мм і частотою 20 коливань за секунду здійснювались за допомогою вібратора. Коливання електроду збільшують вірогідність коротких замикань краплі на торці електрода з ванною та частоту переходу крапель. Аналіз киноплівок і зварних з'єднань показує, що описані коливання несуттєво впливають на перенесення електродного металу в невагомості.

Вплив імпульсів струму. Дослідження впливу імпульсів струму було проведено в умовах динамічної невагомості при зварюванні нержавіючої сталі. Частота імпульсів 40 Гц. Досліди з накладанням імпульсів струму проводились у процесі зварювання одного зразка. По досягненні стану динамічної невагомості спочатку починалось зварювання на заданому режимі без імпульсів, а потім після двох секунд на дуговий проміжок накладались імпульси. При зварюванні на режимі $I_d = 50$ А, $U_d = 15$ В діаметр крапель зменшувався від 6...8 мм до 1,0...1,5 мм, а частота їх перенесення зростала від 0,3 до 40 на секунду. Дослідження показали, що накладання імпульсів струму в умовах невагомості є дуже ефективним. За допомогою досить простих генераторів імпульсів можна ство-

рити кероване перенесення металу за будь-якою наперед заданою програмою.

Слід, однак, відзначити, що проблема переносу металу в значній мірі втрачає свою актуальність, якщо використовуються досить великі струми дуги, тобто якщо потужність дуги не обмежується. Це дозволяє здійснити процес зварювання з частими короткими замиканнями та зменшити розміри крапель.

Особливості кристалізації зварювальної ванни та формування швів. Дослідження показали, що невагомість певним чином впливає на формування зварних швів. Відсутність сили тяжіння веде до того, що під впливом сил поверхневого натягнення розплавлений метал стягується з країв шва, трохи випучуючись посередені. Форма валику шва залишається задовільною. Глибина проплавлення дещо знижується. При перенавантаженнях, навпаки, зменшується посилення валика та збільшується глибина проплавлення.

На рис. 16 наведено загальні види зварюваних зразків, що виконано на різних режимах в умовах вільного польоту, перенавантажень і невагомості.

Зміна властивостей дугового розряду та поведінка рідкого металу на електроді, що викликана невагомістю, при зварюванні на струмах 30...60 А, призводить до порушення умов прогріву металу та виділення з нього газів. У цьому випадку зварювані шви на сплаві АМГ-6 виходять пористими. Підвищення сили струму дозволяє уникнути пор. Сказане стосується зварювання в середовищі аргону при тиску 1 атм.

При зварюванні в космічному вакуумі умови різко змінюються. Суттєво змінюється кінетика виділення газів зі зварювальної ванни. З'являється необхідність стабілізації дугового розряду у вакуумі. Найпростішим методом є застосування ста-

білізуючих соленоїдів, що створюють поздовжнє магнітне поле.

Остаточне судження про придатність дугового зварювання плавким електродом може бути отримано тільки після проведення дослідів у натурних космічних умовах.

Своєчасний або навіть випереджувальний розвиток способів і спеціальної апаратури для зва-

рювання та різання в космосі повинно вплинути на конструкцію, методи збирання та монтажу, надійність і життєздатність міжпланетних кораблів і орбітальних станцій.

Редакція вдячна співробітникам відділу космічних досліджень ІЕЗ Н.В. Піскун та Є.Г. Терновому за допомогу у підготовці матеріалу статті.

Ідеї з використання різних видів зварювання в космосі, описані академіком Борисом Євгеновичем Патонем більше ніж пів століття тому, отримали розвиток у подальші роки. Опис зварювального обладнання і технологій зварювання у відкритому космосі наведено у наступних публікаціях.

1. Paton В.Е., Lapchinskii V.F. (1997) *Welding in space and related technologies*. England, Cambridge Inter. Sci. Publ.
2. (1999) *Автоматическая сварка*, **10** (Специальный выпуск, посвященный космическим технологиям).
3. Paton В.Е. et al. (1999) *Device for manual electron beam processing of materials in Space*. United States, Pat. Number: 5,869,801.
4. (2000) *Космос: технологии, материаловедение, конструкции*. Патон Б.Е. (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.
5. Зубченко Ю. В., Терновой Е. Г. (2015) Разработка новых эмиссионных систем электронно-лучевых пушек для технологических работ в условиях космоса. *Автомат. сварка*, **12**, 36 – 40.
6. Зубченко Ю.В., Терновий Є.Г. Матвійчук В.А. та ін. (2018) *Спосіб формування електронного пучка електронно-променевої гармати для зварювання та споріднених технологій в умовах відкритого космосу*. Україна, Пат. № 117397.
7. Булацев О.Р., Терновий Є.Г., Крюков В.П. та ін. (2019) *Пристрій для наклеювання плівкових покриттів для ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні космічних об'єктів у відкритому космосі*. Україна, Пат. № 137492.
8. Paton В.Е., Lobanov L.M., Naidich Y.U. et al. (2019) New electron beam gun for welding in space. *Science and Technology of Welding and Joining*, **24**(4), 320–326.
9. Lobanov L.M., Asnis E.A., Ternovy Ye.G. et al. (2021) *Some issues of repairing manned space vehicles in outer space using electron beam welding*, **315**, 101–105. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.315.10>



Зварювальне обладнання ІЕЗ під час проведення експерименту у відкритому космосі, липень 1984 р., станція «Салют-7»