

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.040>
УДК 621.791:629.78

Л. М. ЛОБАНОВ, заст. директора, д-р техн. наук, проф., акад. НАН України.
Заслужений діяч науки і техніки України (2004), Золота медаль ім. Б. Патона «За видатні досягнення у створенні інноваційних науково-технічних розробок, які знайшли широке практичне використання» (2022)
ORCID: 0000-0001-9296-2335

E-mail: office@paton.kiev.ua

Ю. М. ЛАНКІН, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-6306-8086

E-mail: lankin.u.n@gmail.com

Є. Г. ТЕРНОВИЙ, заст. зав. відділу «Космічні технології»

ORCID: 0000-0002-4323-0944

E-mail: ev-geo@ukr.net

Н. В. ПІСКУН, зав. відділу «Космічні технології», д-р техн. наук

ORCID: 0000-0003-1459-2310

E-mail: nadamova54@gmail.com

С. О. ГЛУШАК, наук. співроб.

ORCID: 0000-0003-4518-7262

E-mail: electriber@ukr.net

В. Г. СОЛОВЙОВ, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1454-7520

E-mail: hsova@gmail.com

В.Ф. СЕМІКІН, наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7407-5887

E-mail: semikin.kiev@gmail.com

В. Є. ФЕДОРЧУК, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-9929-3231

E-mail: fedorchuk@paton.kiev.ua

І. І. СТАТКЕВИЧ, наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-9403-2123

E-mail: statkevich_igor@ukr.net

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України
вул. Казимира Малевича 11, Київ, Україна, 03150

ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ МОНТАЖНИХ І РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮВАНИХ РОБІТ НА ПОВЕРХНІ МІСЯЦЯ

При освоєнні Місяця створюватимуться довготривалі місячні бази (ДМБ), а також інші об'єкти, що забезпечують життєдіяльність та роботу експедицій. Це можуть бути монтажні-складальні операції під час створення космічних комплексів або ремонтно-профілактичні роботи, пов'язані із забезпеченням тривалості експлуатації діючих систем.

Цитування: Лобанов Л. М., Ланкін Ю. М., Терновий Є. Г., Піскун Н. В., Глушак С. О., Соловйов В. Г., Семікін В. Ф., Федорчук В. Є., Статкевич І. І. Елементи технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів для монтажних і ремонтно-відновлюваних робіт на поверхні Місяця. *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 2 (147). С. 40—53. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.040>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Експерименти зі зварювання у космосі, проведені на автоматичному обладнанні «Вулкан», а також зварювання ручним електронно-променевим інструментом УРІ у відкритому космосі показали, що електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) є оптимальним технологічним процесом для виконання зварювальних робіт у космічних умовах. При цьому процесі ефективний коефіцієнт корисної дії становить 85...90 %, що є максимальним серед інших способів зварювання. ЕПЗ в умовах земної гравітації дозволяє забезпечити механічні та хімічні властивості зварних з'єднань, а також їхню щільність майже на рівні основного металу конструкції, що є неможливим при інших способах зварювання. Так, коефіцієнт міцності металу шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ, становить 0.85...0.93, а при дугових і плазмо-дугових способах він становить 0.7...0.8. Водночас отримання таких властивостей зварних з'єднань у космічних умовах є складним. Як відомо, знижена гравітація, низькі температури та надвисокий вакуум, які є природним середовищем на місячній поверхні, сприяють утворенню внутрішніх нещільностей у вигляді пор у зварних швах (ЗШ). Це у першу чергу проявляється при зварюванні алюмінієвих сплавів, які використовуються як основний матеріал в конструкціях космічних апаратів.

Для отримання якісних зварних з'єднань і виключення в ЗШ таких дефектів, як пори, тріщини та несплавлення крайків у корені шва, було розроблено і виготовлено систему апаратури періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагрівання по заданій траєкторії.

В результаті проведених технологічних робіт з використанням комплексу апаратури періодичного відхилення електронного пучка було отримано зварні з'єднання (ЗЗ) зі сплавів АМгб, А1570 та 1201 товщиною від 2 до 8 мм. Отримані ЗЗ підлягали візуальному огляду, рентгенівському контролю на визначення зовнішніх і внутрішніх дефектів у швах. Також було проведено механічні випробування на міцність опору розривом, визначено елементний склад та виконано металографічні дослідження ЗЗ, отриманих запропонованим способом. Результати випробувань показали високу якість ЗЗ із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ за допомогою системи періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагріву по заданій траєкторії.

Метою даної роботи були аналіз способів дегазації розплавленого металу зварювальної ванни, а також розробка і випробування елементів технологічного процесу ЕПЗ алюмінієвих сплавів за допомогою створеної апаратури, які при виконанні монтажних та ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця дозволять отримувати якісні ЗЗ, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення.

Ключові слова: довготривалі місячні бази, надвисокий вакуум, низькі температури, електронно-променеве зварювання, алюмінієві сплави, зварні з'єднання, дефекти у швах, нещільності, пори, система періодичного відхилення електронного пучка, розгортка, рентгенівська дефектоскопія, механічні властивості, елементний склад, макроструктура, мікроструктура, основний метал, метал шва, зона термічного впливу.

Особливі умови на поверхні Місяця ускладнюють проведення технологічних процесів і вимагають створення спеціалізованого обладнання та сучасних і надійних технологій для виконання зварювальних робіт [9, 11]. А такі фактори, як знижена гравітація, низька температура та надвисокий вакуум, що є основними фізичними умовами місячної поверхні, сприяють утворенню дефектів у зварних з'єднаннях (ЗЗ) [3].

Знижена гравітація може сприяти виникненню нещільностей у вигляді пористості у швах, яка пов'язана з тим, що в низьких гравітаційних полях не відбувається природного спливання пухирців пари чи газу зі зварювальної ванни [6]. Це особливо проявляється при зварюванні алюмінієвих та інших матеріалів з підвищеним вмістом розчинених газів (в основному водню), а також в наявності елементів з високою пружністю пари у металі зварної конструкції [2].

Дослідженнями також встановлено, що однією із причин утворення пор при зварюванні алюмінію та його сплавів є водень, що міститься в окисній плівці на крайках зварюваного металу [7].

Відомо, що одним із методів боротьби з підвищеним утворенням пор при ЕПЗ-зварюванні алюмінієвих сплавів є використання модульованої потужності [5]. Але при цьому методі утворюються виплески зі зварювальної ванни у вигляді бризок розплавленого металу, що неприпустимо при проведенні технологічних робіт у космічних умовах [12].

У роботі [5] запропоновано метод зварювання з розщепленням електронного пучка на кілька теплових джерел при скануванні його по заданій траєкторії. Цей метод заснований на динамічному позиціонуванні пучка, який здійснюється за рахунок високочастотного керування переміщенням та відхиленням променя відносно сти-

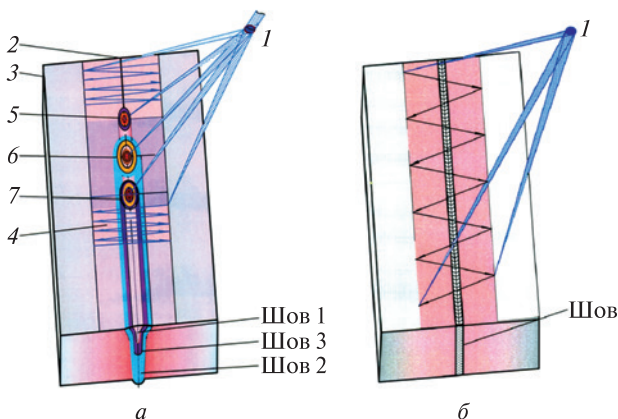


Рис. 1. Схеми процесу електронно-променевого зварювання: *а* — з попереднім підігрівом та підігрівом після зварювання (1 — сканувальний пучок, 2 — зварний стик, 3 — попереднє підігрівання сканувальним пучком, 4 — термообробка після зварювання, 5, 6, 7 — зварювальні ванни 1–3); *б* — при попередній термообробці

ку і його фокусуванням таким чином, що пучок діє одночасно в кількох місцях (рис. 1, *а*) [5]. При цьому відбувається формування декількох теплових джерел, які забезпечують одночасне введення тепла у різні ділянки зварюваної заготовки. При цьому зварювальні ванни розташовуються на деякій відстані одна від одної. Таке розщеплення пучка дозволяє виконувати ЕПЗ у різних варіаціях: зварювання відразу в кількох оброблюваних зонах з утворенням декількох зварювальних ванн, що йдуть одна за одною, поєднання зварювання та термообробки. Але при такій схемі процесу ЕПЗ з утворенням кількох зварювальних ванн, що переміщуються послідовно одна за другою, є велика вірогідність утворення інтерметалідів у металі шва і у зоні термічного впливу, які негативно впливають на експлуатаційні характеристики ЗЗ [1].

Також відомо, що для зменшення інтенсивності утворення пор та уникнення створення тріщин перед зварюванням алюмінієвих сплавів виконують попередню термообробку всього виробу безпосередньо електронним пучком, або, в залежності від габаритів виробу, тільки зону зварювання до температури $T_1 = 180...200$ °С. Це дозволяє виключити утворення тріщин, несплавлення крайків, порожнин у ЗТВ, МШ та корені шва за рахунок часткової дегазації роз-

чиненого водню на поверхні крайків основного металу (ОМ), а також підвищити пластичність металу перед зварюванням (рис. 1, *б*). Операція попередньої термообробки металів провадиться несфокусованим сканувальним електронним пучком малої щільності, а потім виконується зварювання з гострим сфокусованим пучком.

Але, як показали результати досліджень, для керування процесом кристалізації металу і більш інтенсивного спливання бульбашок з газом або з парами металу, необхідно також здійснювати термообробку і після зварювання.

Враховуючи ці обставини, було запропоновано однопрохідний процес з однією зварювальною ванною і попередньою та наступною термообробкою шва, з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою електронного пучка з програмованою тепловою інтенсивністю в кожній зоні технологічного процесу [8].

Були проведені технологічні експерименти зі зварювання зразків із алюмінієвих сплавів запропонованим способом. На початковій стадії досліджень зварювання зразків із сплавів А1570 і АМг6 виконували електронним пучком без сканування по заданій траєкторії. На рис. 2 показано пори на окремих ділянках зварних з'єднань, отриманих цим способом. Підвищену пористість у швах можна пояснити тим, що у глибокому парогазовому каналі бульбашки не встигають вийти на поверхню розплавленого металу, а масообмін розплавленого металу сприяє переміщенню їх у хвостову частину ванни, яка вже кристалізується, де і відбувається їхня фіксація у вигляді пор у металі шва (МШ), в зоні часткового оплавлення на кордоні з лінією сплавлення, а також в корені шва. У процесі подальшого виконання технологічних робіт було застосовано традиційний спосіб дегазації зварювальної ванни перемішуванням розплавленого металу безперервним одностороннім скануванням електронного пучка з круговою розгорткою діаметром 2 мм і частотою 180 Гц. Але, як показали результати, цей спосіб також не завжди сприяє повній дегазації зварювальної ванни, особливо при зварюванні алюмінієвих сплавів середніх і великих товщин [10].

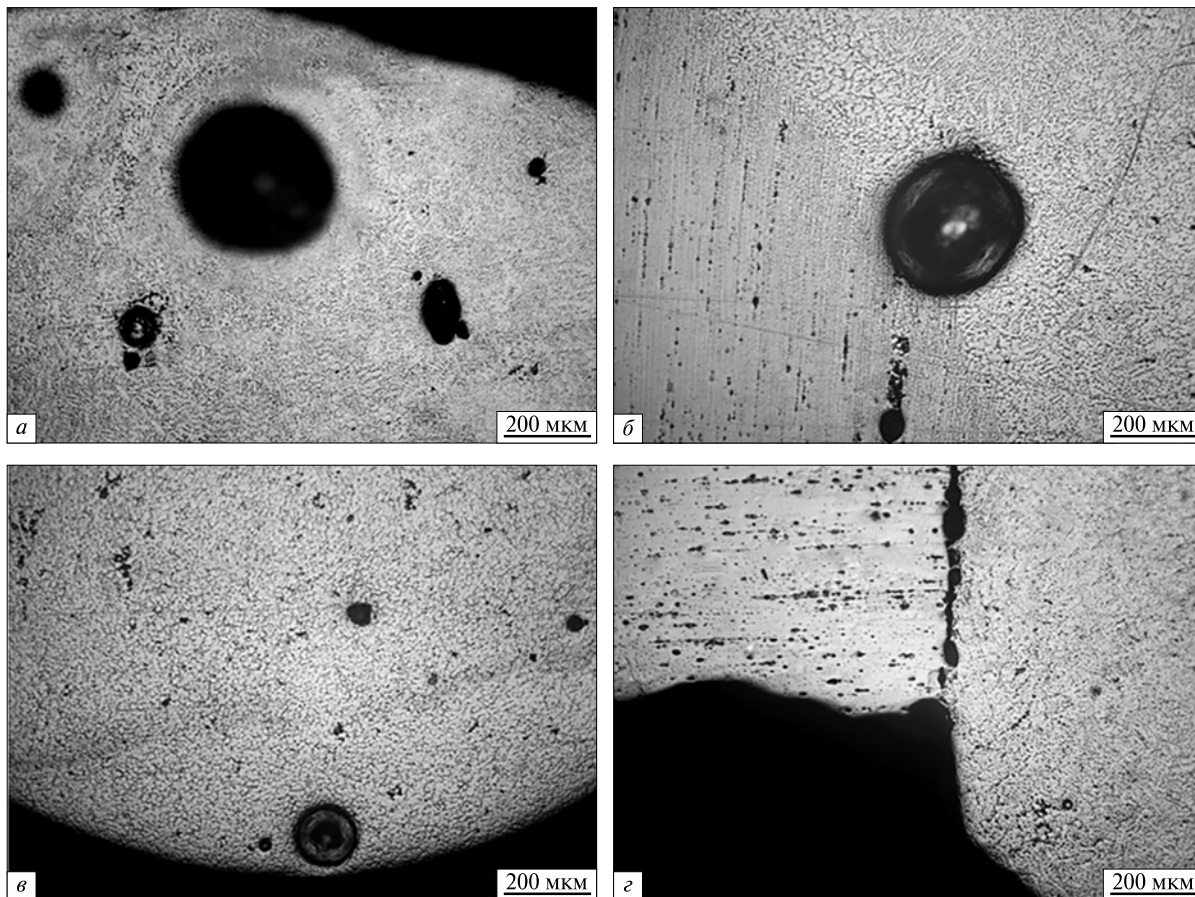


Рис. 2. Мікроструктури ділянок зварних стикових з'єднань, отриманих електронно-променевим зварюванням без сканування електронним пучком стикових зразків із сплавів А1570 (а, б, в) і АМг6 (г) товщиною відповідно 8 і 6 мм: а — права верхня частина металу шва, б — кордон лінії сплавлення з основним металом, в — корінь шва, г — несплавлення крайків у лівій частині кореня шва

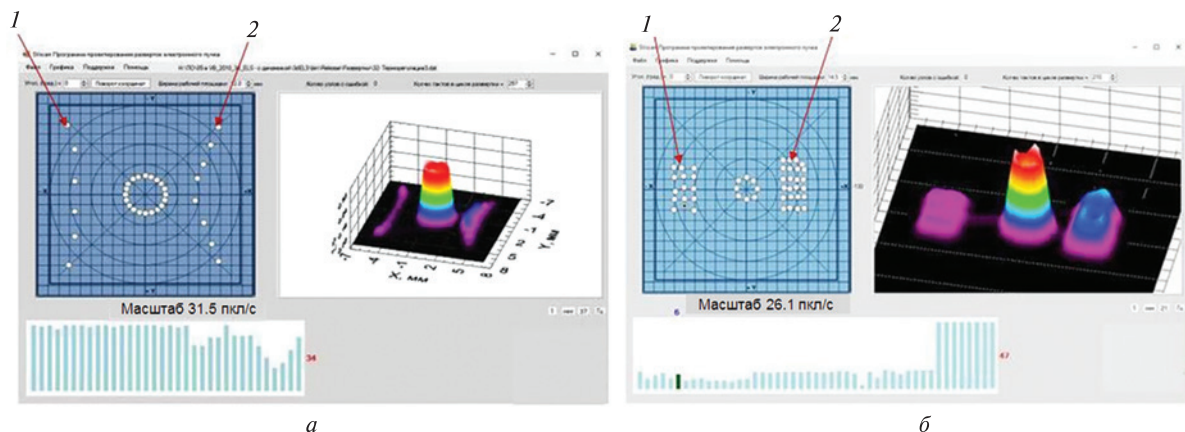


Рис. 3. Варіанти розгортки: а — з попередньою та подальшою термічною обробкою шва (1 — попередня термічна обробка, 2 — подальша термічна обробка); б — з попереднім підігрівом та наступною термообробкою з різними тепловими впливами щодо дії амплітуди (1 — попередній підігрів, 2 — наступна термообробка)

Для дослідження запропонованого способу було проведено моделювання з використанням процесів термообробки зі зварюванням за один прохід, який здійснюється розщепленням електронного пучка на необхідну кількість зон впливу (дві або три) при великій частоті сканування, що дозволяє електронному пучку впливати на різні зони та виконувати інтенсивне переміщення у шві (рис. 3, а). Це буде сприяти спливанню бульбашок із середини МШ на його поверхню та залишати її зовсім. Також було запропоновано побудувати періодичний розподіл інтенсивності підігріву перед зварним швом і за електронним пучком таким чином, щоб зменшити швидкість охолодження. Схему процесу зварювання, під час якого відбувається зміна фокуса пучка синхронно з відхиленням, показано на рис. 3, а.

При цьому було використано систему проектування SVscan, завдяки якій можна створити рисунок траєкторії (апроксимувати) розгортки з використанням різної кількості точок (з можливістю їхнього розширення), що дозволяє системі періодичного відхилення електронного пучка реалізувати частоту сканування від 100 до 1000 Гц. У цієї системи є можливість оцінювати інтенсивність нагрівання у будь-якій точці поверхні та переглядати в 3D-зображенні остаточний розподіл щільності потужності електронного пучка в зоні нагрівання в динаміці при зміні частоти сканування. Така система значно полегшує проектування розгортки електронного пучка. На рис. 3, б представлено варіант розгортки з попередньою та подальшою термічною обробкою шва.

Як показали результати моделювання і попередні експерименти, найбільш оптимальним є варіанти розгортки з попереднім і подальшим підігрівом та різним тепловим впливом по траєкторії розгортки. Було випробувано 47 «вузлів» з частотою розгортки 180 Гц. При цьому діаметр реверсної кругової зварної розгортки становить 2 мм, а діаметр сфокусованої плями електронного пучка — 0.8 мм. Відносна швидкість переміщення зони нагріву дорівнює 0.4 м/хв. Цей варіант розгортки з попереднім підігрівом та наступною термообробкою з різними тепловими

впливами відносно дії амплітуди зварювального пучка представлено на рис. 3, б.

Таким чином, були розроблені варіанти розгортки для відпрацювання елементів технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів з перемішуванням зварної ванни сканувальним пучком і запрограмованою періодичною інтенсивністю теплової дії, яка дозволяє керувати електронним пучком з різною інтенсивністю нагріву. За допомогою електронного променя заданої потужності здійснювалося попереднє і подальше підігрівання зразка. У процесі зварювання за спеціальною програмою промінь розгортався до необхідної конфігурації в одному та другому напрямку. Він сканував вздовж всього шва і виконував зварювання з перемішуванням розплавленої ванни реверсною круговою розгорткою діаметром 2 мм. Хвостова частина ванни при цьому підігрівалась впродовж всього процесу зварювання. Бульбашки, які утворювалися у хвостовій частині, встигали вийти на поверхню і залишити її. Особливо важливо, що при цьому значення струму фокусування залишалося незмінним при відхиленні пучка в режимах попередньої і наступної термообробки.

Поєднання зварного процесу, попередньої та наступної термообробки призводить до збільшення часу циклу роботи розгортки та зменшення частоти сканування електронного пучка, що необхідно враховувати при проектуванні розгортки.

Для технологічних випробувань використовувалися зразки стикових з'єднань з відборткуванням крайків із алюмінієвих сплавів АМг6, А1570 і 1201, які застосовуються як основний конструкційний матеріал космічної техніки [4].

Технологічні роботи виконували у вакуумному стенді ОБ1469м, в якому були змонтовані маніпулятор з електронно-променевою гарматою ПЛ104 [12], зварювальний мідний стіл зі зразками і охолоджувана мідна мішень для оптимізації режимів зварювання. Живлення електронно-променевої гармати здійснювалося від лабораторного джерела ИУН-5 з прискореною напругою 10 кВ. Зварювання зразків виконувалося зі скануванням електронного пучка по реверсній круговій траєкторії, а також з відхиленнями пуч-

ка для попередньої і подальшої термообробок при швидкості 25 м/год. Режими зварювання, розподіл інтенсивності нагріву і отримані макрошліфи приведено в табл. 1.

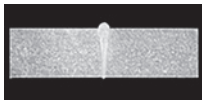






Зварювання виконувалося пучком без сканування (зразок 1), за допомогою традиційного безперервного сканування (зразок 2), а також за допомогою періодичного відхилення пучка з попереднім та наступним підігрівом несфокусованим пучком і з гострим сфокусованим зварювальним пучком, який сканував по реверсній круглій траєкторії діаметром 2 мм з частотою 180 Гц (табл. 1, зразки 3...7). Зовнішній вигляд отриманих зварних з'єднань показано на рис. 4.

Верифікацію якості отриманих з'єднань здійснювали візуальним і рентгенівським контролем, механічними випробуваннями, визначенням елементного складу ОМ та МШ, а також металографічними дослідженнями зварних з'єд-

нань, отриманих запропонованим способом. При ретельному візуальному огляді зварених зразків було оцінено їхнє проплавлення, а також якість зовнішнього вигляду швів з лицевого та зворотного боків. Аналіз огляду зварних зразків показав, що найякіснішими є стикові з'єднання, отримані з використанням періодичного відхилення пучка з реверсною круговою розгорткою і попередньою та повторною термообробкою (рис. 4). Для вивчення геометрії проплавлень, отриманих цим способом зварювання, були виготовлені макрошліфи, показані в табл. 1.

Рентгенівський контроль зварних з'єднань провадився на з'єднаннях із сплавів АМг6, А1570 та 1201, показаних на рис. 5. Контроль здійснювався з метою виявлення прихованих дефектів у з'єднаннях по всій довжині (пори, раковини, тріщини, непровари тощо) і виконувався на рентгенівському апараті РАП-150/300 (фокус

Таблиця 1. Режими зварювання зразків із алюмінієвих сплавів АМг6, А1570 та 1201 (товщина d , струм I , струм фокусування $I_{\text{фок}}$, доля затрачених потужностей на попереднє нагрівання, зварювання і наступне нагрівання $P_{\text{поп}}$, $P_{\text{звар}}$, $P_{\text{наст}}$, амплітуда a , частота f)

№	Сплав	d , мм	Режими зварювання			a , мм	f , Гц	Макрошліфи
			I , мА	$I_{\text{фок}}$, мА	$P_{\text{поп}}/P_{\text{звар}}/P_{\text{наст}}$, %			
1	Амг 6, без сканування	6	135	262	—	—	—	
2	Амг 6, безперервне сканування	6	145	268	—	2	180	
3	Амг 6, періодичне відхилення	6	170	278	25/65/10	2	180	
4	-“-	4	155	252	15/70/15	2	180	
5	-“-	2	125	248	15/75/10	2	180	
6	А1570	8	185	282	25/70/5	- “ -	160	
7	1201	5	185	282	25/70/5	1.5	160	

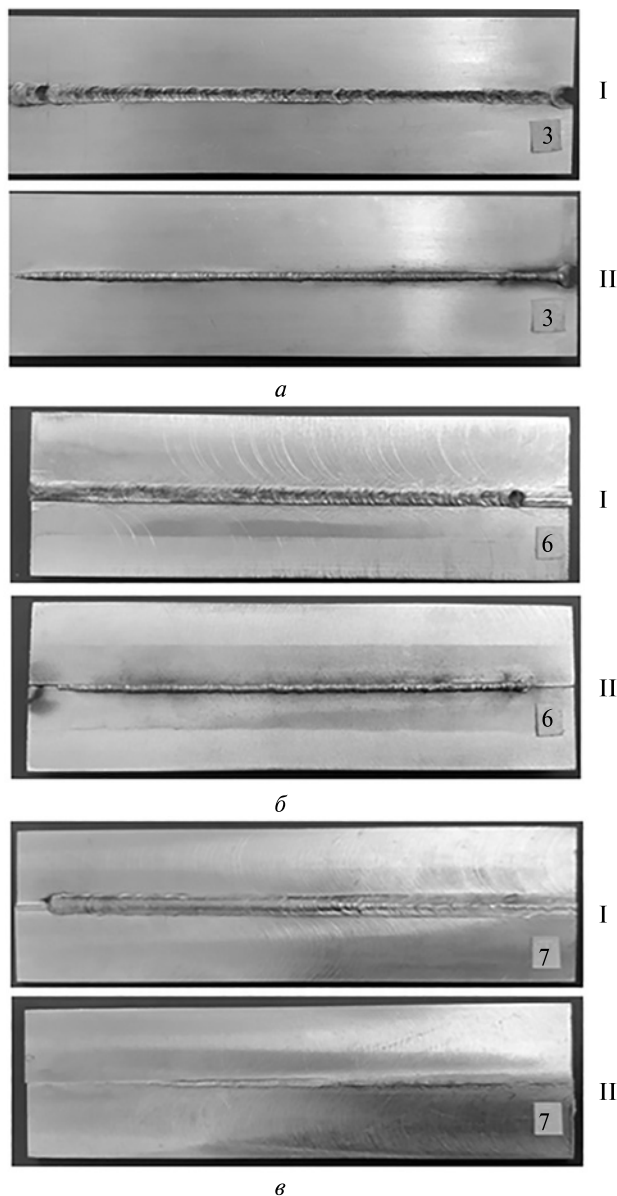


Рис. 4. Зовнішній вигляд зразків алюмінієвих сплавів з відборткуванням і наскрізним проплавленням: *a* — сплав АМг6 товщиною 6 мм, *б* — сплав А1570 товщиною 8 мм, *в* — сплав 1201 товщиною 5 мм (I — лицевий бік, II — зворотний бік)

1.2 мм, $F = 1.0$ м, $U = 100$ кВ, $I = 8.0$ мА, плівка РТ-5). Чутливість методу контролю становила 0.05 мм. Обробка результатів контролю провадилася за допомогою спеціального пристрою до комп'ютера і фіксувалася у вигляді позитивних зображень. Зварні з'єднання, отримані елек-

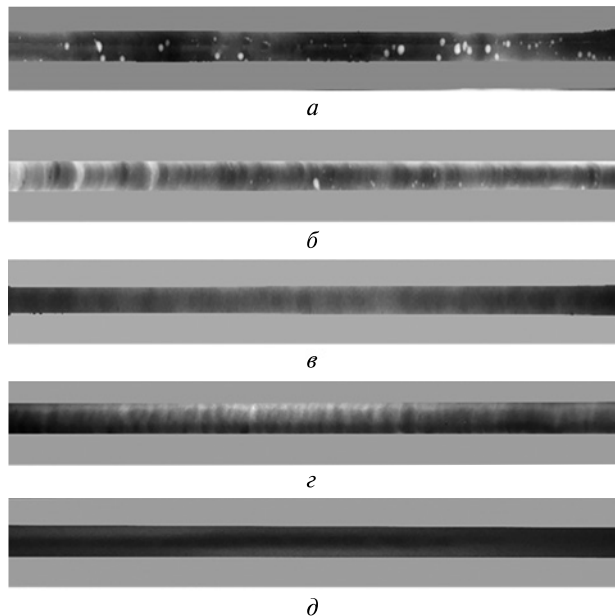


Рис. 5. Рентгенівські зображення стикових зварних з'єднань, отриманих електронно-променевим зварюванням: *a* — сплав АМг6 товщиною 6 мм (без сканування), *б* — сплав АМг6 товщиною 6 мм (з неперервним скануванням круговою розгорткою), *в* — сплав АМг6 товщиною 6 мм (з періодичним відхиленням), *г* — сплав А1570 товщиною 8 мм (з періодичним відхиленням), *д* — сплав 1201 товщиною 5 мм (з періодичним відхиленням)

Таблиця 2. Значення міцності розриву σ_B (інтервали та середні) і коефіцієнта міцності n зварних зразків із алюмінієвих сплавів АМг6, А1570 та 1201, отриманих ЕПЗ з періодичним відхиленням

Сплав	d , мм	σ_B , МПа		n
		зварні з'єднання	основний метал	
АМг6	6	304...310 (306)	335...340 (338)	0.9
А1570	8	330...342 (338)	362...374 (368)	0.91
1201	5	368...377 (370)	413...424 (417)	0.89

тронним пучком без сканування (рис. 5, *a*) і неперервним скануванням з круговою односторонньою розгорткою (рис. 5, *б*), показали наявність пор розміром від 0.3 до 1.0 мм. А у з'єднаннях, отриманих з періодичним відхиленням, внутрішні дефекти не виявлено (рис. 5, *в*, *д*).

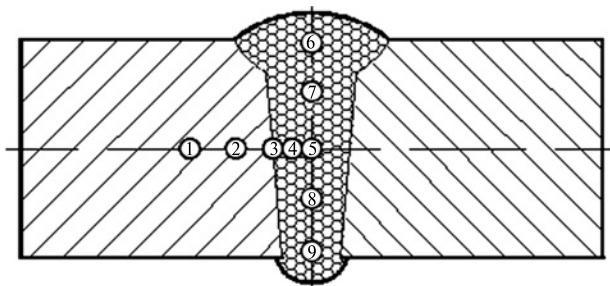


Рис. 6. Точкові визначення елементного складу зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ з періодичним відхиленням електронного пучка: 1 — основний метал, 2 — зона термічного впливу, 3 — лінія сплавлення, 4 — метал шва в середній частині на межі з лінією сплавлення, 5 — метал шва в центральній частині, 6 — метал шва в середній верхній частині шва, 7 — метал шва по осі шва між точками 5 і 6, 8 — метал шва по осі шва між точками 5 і 9, 9 — метал в кореневій частині шва

Таблиця 3. Елементний склад зварного з'єднання із різних сплавів, отриманих ЕПЗ з періодичним відхиленням

Номер спектру	Елементний склад, %							
	Cu	Mg	Al	Si	Sc	Mn	Fe	Zr
Сплав А1570, товщина 8 мм								
S1	—	6.91	92.55	—	0.13	0.12	0.18	0.11
S3	—	6.98	92.35	—	0.19	0.17	0.21	0.10
S4	—	6.84	92.46	—	0.19	0.18	0.21	0.12
S5	—	6.93	92.46	—	0.12	0.14	0.19	0.16
S6	—	6.72	92.50	—	0.23	0.16	0.20	0.19
S9	—	6.78	92.63	—	0.13	0.13	0.19	0.14
Сплав АМг6, товщина 6 мм								
S1	—	6.79	92.25	0.22	—	0.52	0.22	—
S3	—	6.88	92.35	0.09	—	0.48	0.20	—
S3	—	6.84	92.08	0.19	—	0.68	0.21	—
S4	—	6.89	92.77	0.10	—	0.00	0.24	—
S5	—	6.64	92.53	0.23	—	0.60	0.00	—
S6	—	6.78	93.09	0.13	—	0.00	0.00	—
S7	—	6.73	93.08	0.18	—	0.01	0.00	—
S8	—	6.72	92.41	0.19	—	0.68	0.00	—
S9	—	6.68	92.34	0.13	—	0.65	0.20	—
Сплав 1201, товщина 6 мм								
S1	7.59	—	91.99	0.13	—	0.29	0.00	—
S3	7.95	—	91.36	0.20	—	0.32	0.16	—
S4	7.14	—	92.18	0.05	—	0.35	0.27	—
S5	6.79	—	92.59	0.11	—	0.38	0.13	—
S6	7.05	—	92.36	0.10	—	0.29	0.20	—
S9	6.75	—	92.51	0.14	—	0.37	0.22	—

Результати механічних випробувань 33, отриманих періодичним відхиленням для всіх сплавів, свідчать про те, що всі вони мають високу стабільність показників тимчасового опору та високі показники коефіцієнтів міцності (табл. 2). Визначення локального елементного складу 33

із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ, проводилися за допомогою растрового електронного мікроскопа Tescan Mira3 LMU. Оцінка локального елементного складу виконувалась детектором ЕДС Oxford X-max 80 mm, встановленим на растровому електронному мікроскопі. Точки

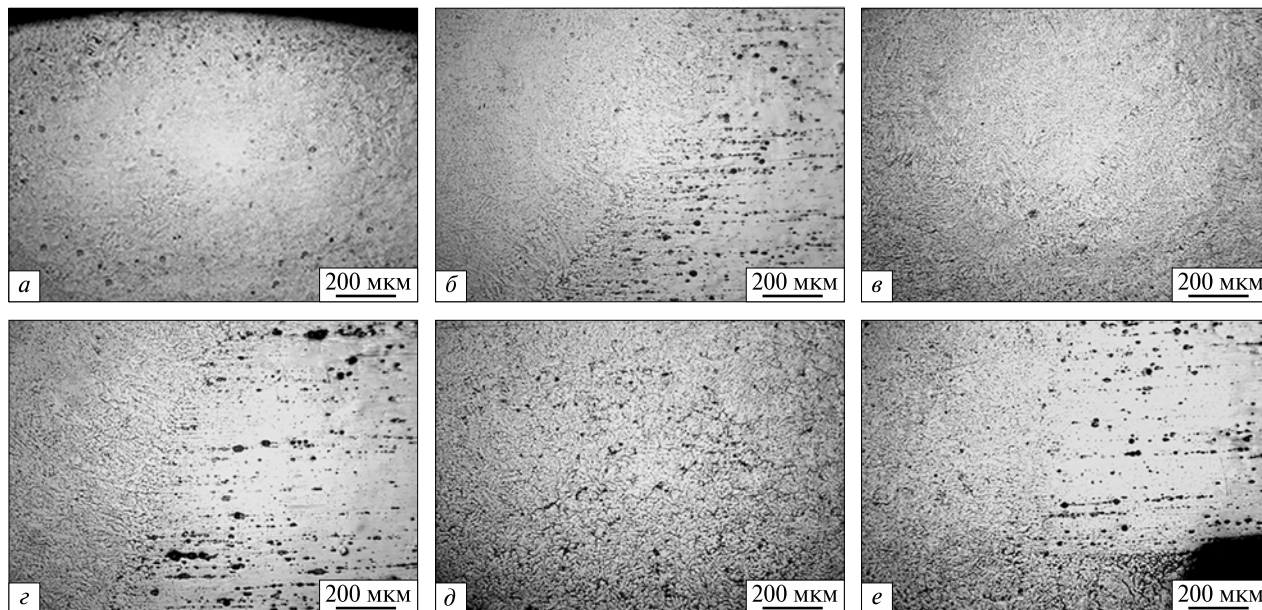


Рис. 7. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву АМг6 товщиною 6 мм, отриманого електронно-променевим зварюванням з періодичним відхиленням: *a* — метал шва у верхній частині, *b* — зона сплавлення метал шва з основним металом у верхній частині, *c* — зона сплавлення метал шва з основним металом в середній частині, *d* — метал шва в кореневій частині, *e* — зона сплавлення метал шва в кореневій частині з основним металом

локального визначення елементного складу показані на рис. 6, а їхні чисельні значення приведені в табл. 3.

Аналіз елементного складу в ЗЗ, отриманих ЕПЗ з періодичним відхиленням, показав рівномірний розподіл всіх елементів від основного металу до метал шва, за виключення складу легкого елементу магнію у сплавах АМг6 і А1570, який в середній частині метал шва виявився зниженим приблизно на 0.25 %. Зниження на 0.25 % магнію не вплинуло на механічні властивості зварних з'єднань.

Металографічні дослідження макро- та мікроструктур виконували на поперечних шліфах. Для виявлення макроструктури ЗЗ Al-Mg-систем легування застосовували хімічне травлення в розчині кислот: $0.5 \text{ см}^3 \text{ HF} + 1.5 \text{ см}^3 \text{ HCl} + 2.5 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3 + 95.5 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$. Для системи Al-Cu використовували послідовне травлення спочатку в 10 % водному розчині NaOH, потім у 30 % водному розчині HNO_3 . Дослідження виконували візуально при збільшенні до $\times 5$ для виявлення великих дефектів. Макроструктури ЗЗ показано у табл. 1.

Дослідження особливостей мікроструктури здійснювали на поперечних підготовлених зразках ЗЗ, що включали ділянки основного металу, ЗТВ і метал шва, за допомогою оптичного мікроскопа ММТ-1600В з цифровою камерою Webbers MScore 300M. Виявлення мікроструктури ЗЗ відбувалося у процесі електролітичного полірування в реактиві такого складу: $930 \text{ см}^3 \text{ CH}_3\text{COOH}$, $70 \text{ см}^3 \text{ HClO}_4$. Час полірування становив 5...10 с при напрузі 100 В. Виявлені мікроструктури ЗЗ показано на рис. 7—9.

На рис. 7 представлено виявлені мікроструктури ЗЗ сплаву АМг6, отримані ЕПЗ з періодичним відхиленням. Видно, що в основному металі спостерігається явно виражена стрічкова текстура прокатування. Зварювання відбувалося поперек напрямку прокатування. Структура литого метал шва дендритна. У цілому метал шва щільний, але в корені шва спостерігається невелика кількість евтектичних включень. Пористість у металі шва практично відсутня. Поодинокі пори, що спостерігаються у металі шва, не перевищують 30 мкм у діаметрі. Також спо-

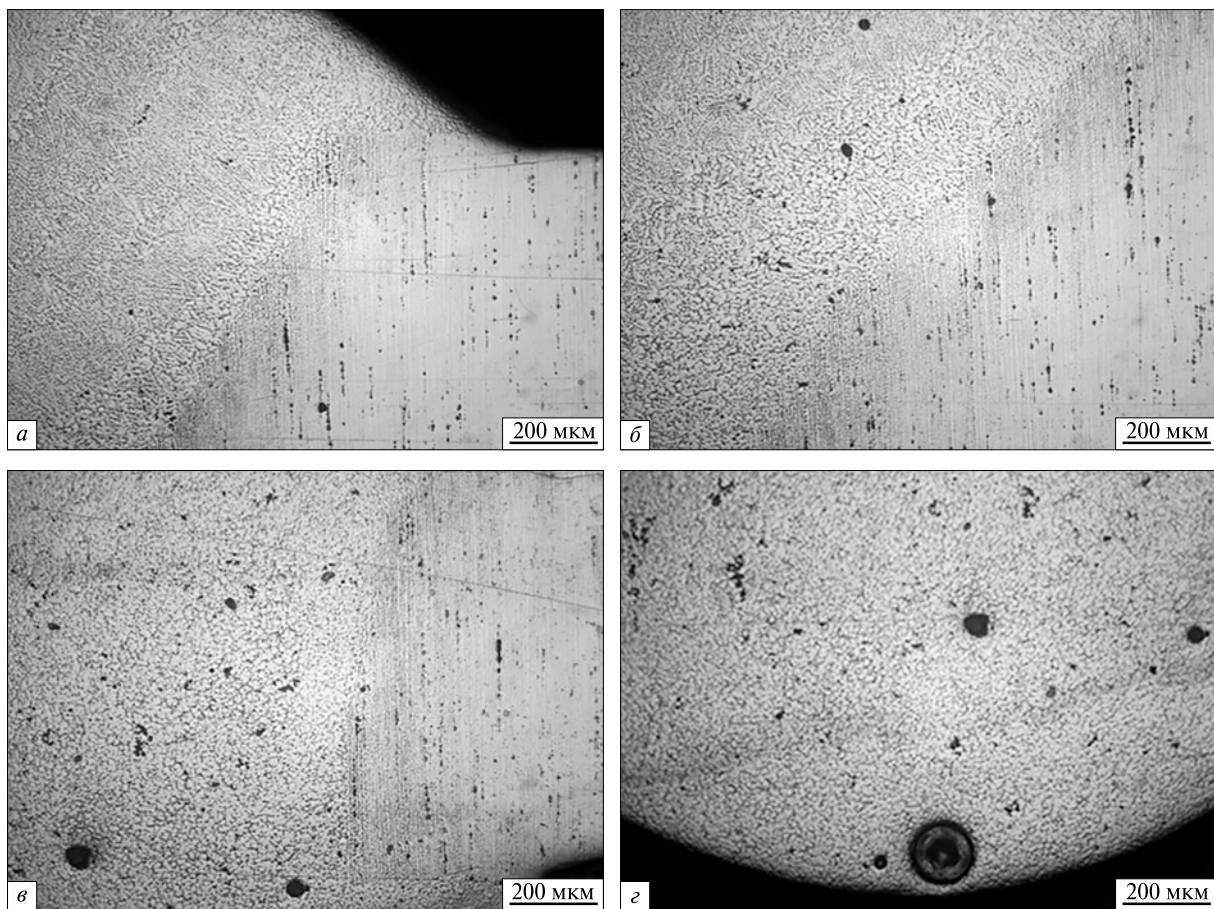


Рис. 8. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву А1570 товщиною 8 мм, отриманого електронно-променевим зварюванням з періодичним відхиленням: *а* — зона сплавлення металу шва з основним металом (верхня частина), *б* — зона сплавлення металу шва з основним металом (середня частина), *в* — зона сплавлення металу шва з основним металом (нижня частина), *г* — корінь шва

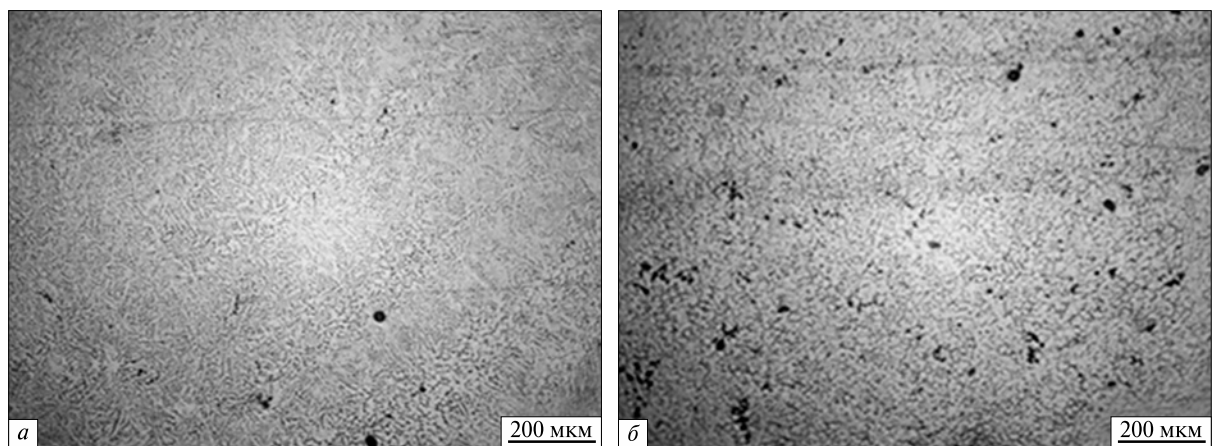


Рис. 9. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання сплаву 1570, отриманого електронно-променевим зварюванням з періодичним відхиленням: *а* — дендритна структура, *б* — субдендритна структура

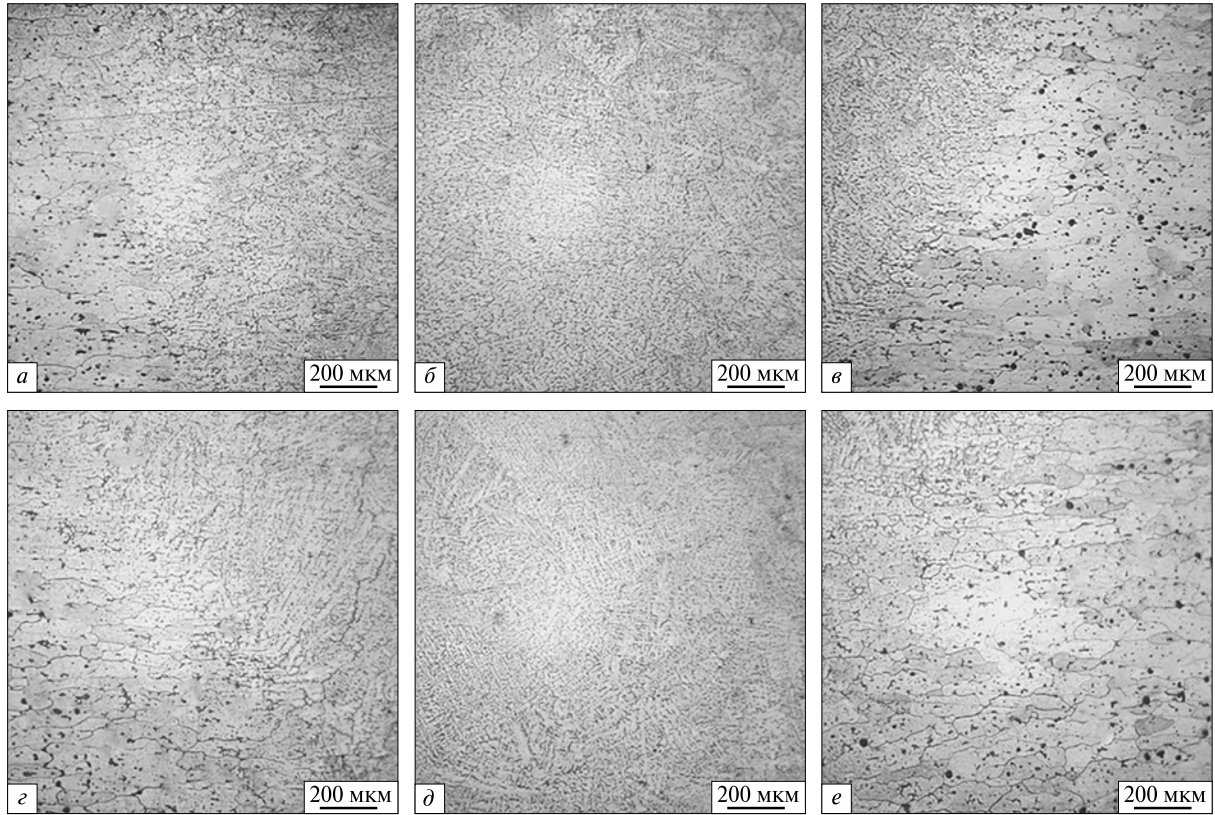


Рис. 10. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву 1201 товщиною 5 мм, отриманого електронно-променевою зваркою з періодичним відхиленням: *а* — зона сплавлення металу шва з основним металом (верхня частина зліва), *б* — основний метал (верхня частина посередині), *в* — зона сплавлення металу шва з основним металом (верхня частина справа), *г* — зона сплавлення металу шва з основним металом (нижня частина зліва), *д* — основний метал (нижня частина посередині), *е* — зона сплавлення металу шва з основним металом (нижня частина справа)

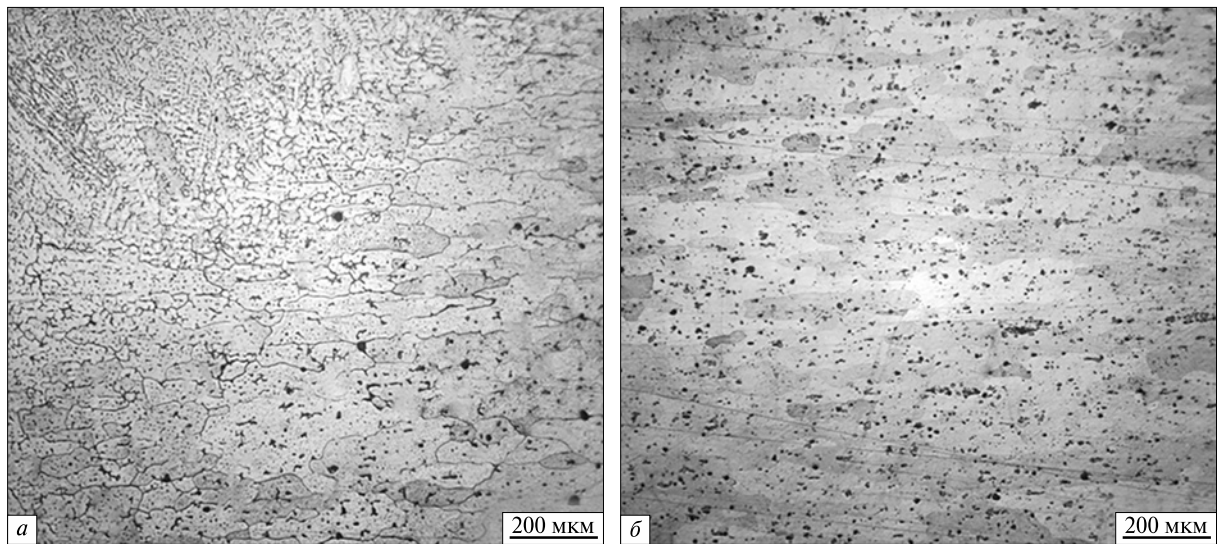


Рис. 11. Мікроструктура зони сплавлення та термічного впливу (*а*) і основного металу (*б*)

стерігаються окремі пори розміром до 100 мкм в зоні лінії сплавлення. Відповідно до стандартів ці дефекти допустимі.

На рис. 8 показано виявлені мікроструктури 33 сплаву А1570, отриманого ЕПЗ з періодичним відхиленням. Структура основного металу свідчить, що зварювання виконували вздовж напрямку прокатування. По шву спостерігаються окремі пори, переважно у нижній частині шва. Розмір пор не перевищує 100 мкм (рис. 8, *г*).

Структура металу шва переважно дендритна (рис. 9, *а*). Але, скандій, наявний у сплаві, призводить до формування у певних ділянках шва сплаву 1570 субдендритної структури (рис. 9, *б*). Ознак рекристалізації основного металу в ЗТВ не помічено.

На рис. 10 показано виявлені мікроструктури 33 сплаву 1201. Щільна структура металу шва спостерігається в основному об'ємі. Структура шва дендритна, дендритний параметр по висоті шва суттєво не змінюється. Тобто, структура металу шва стабільна по об'єму. Спостерігаються одиничні пори в корені шва розміром до 100 мкм. У зоні сплавлення та термічного впливу наявні дрібні пори розміром до 40 мкм. Пори спостерігаються на глибину до 1000 мкм від лінії сплавлення у зварюваний метал. Така картина характерна для всіх 33 сплаву 1201, отриманих зварюванням плавленням, незалежно від способу. Крім того, у ЗТВ безпосередньо біля лінії сплавлення спостерігається часткове оплавлення металу з характерним ростом міжзеренних прошарків (рис. 11, *а*). Ближче до основного металу спостерігається явна рекристалізація металу (рис. 11, *б*). Дефектів у вигляді тріщин не виявлено.

Результати металографічних досліджень 33 сплавів АМг6, А1570 і 1201, отриманих періо-

дичним способом відхилення, показали, що структура металу всіх швів дендритна. У цілому метал шва 33 щільний, пористість у металі шва практично відсутня. Поодинокі пори, що спостерігаються у металі шва, не перевищують 30 мкм в діаметрі. Також спостерігаються окремі пори розміром до 100 мкм в зоні лінії сплавлення. Згідно із стандартами ці дефекти допустимі.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновані варіанти розподілу потужностей теплової дії електронного пучка дозволяють синтезувати управління електронним пучком для створення заданого температурного поля при ЕПЗ з одночасним попереднім підігрівом і подальшою термообробкою.

2. Розроблені елементи технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів однопрохідним способом з попереднім підігрівом та наступною термообробкою шва з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою і періодичним відхиленням електронного пучка надають нові можливості для створення конструкцій в умовах поверхні Місяця.

3. Випробування механічних властивостей, металографічні дослідження і елементний склад 33 показали високу якість з'єднань, отриманих способом періодичного відхилення пучка при зварюванні з попереднім підігрівом та подальшою термообробкою.

Результати досліджень, використані для створення цієї статті, були отримані в рамках Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр. Ці результати можуть бути використані при будівництві та експлуатації стаціонарних споруд і обладнання на поверхні Місяця в рамках програми «Артеміда».

ЛІТЕРАТУРА

1. Башенко В. В., Вихман В. Б. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки. Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки: Матер. I С.-Петер. Междунар. науч.-техн. конф. (19—22 мая 2008 г.). СПб.: ВиТ-Принт, 2008. С. 5—21.
2. Бондарев А. А., Рабкин Д. А. Испарение легколетучих элементов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов. *Автомат. сварка*. 1974. № 3 (252). С. 13—16.
3. Бондарев А. А., Терновой Е. Г. Особенности формирования швов и свойства соединений алюминиевых и магниевых сплавов в условиях, имитирующих космические. *Автомат. сварка*. 2010. № 11. С. 22—27.
4. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев: Наук. думка, 2013. 414 с.

5. Ольшанская Т. В., Саломатова Е. С. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке. *Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2016. **18**, № 4.
6. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. *Сварка и родственные технологии в космосе*. Киев, Наук. думка, 1998. 183 с.
7. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. Киев: Наук. думка, 1986. 256 с.
8. Соловійов В. Г., Ланкін Ю. М., Романова І. Ю. Програмування розгортки електронного пучка для зварювання з термообробкою. *Автомат. зварювання*. 2022. № 4. С. 1–7.
9. Терновий Є. Г., Патон Б. Є., Лобанов Л. М., Асніс Ю. А., Зубченко Ю. В., Статкевич І. І. Комплекс апаратури для електронно-променевого зварювання в умовах поверхні Місяця. *7-ма Міжнар. конф. «Космічні технології: сучасне і майбутнє»*: тези доп. Дніпро, 2019. С. 113.
10. Терновой Е. Г., Лобанов Л. М. Особенности электронно-лучевой сварки толстостенных оболочек из алюминиевых сплавов. 7-я Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: тез. докл. Днепр, 2019. С. 93.
11. Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Yu. A., Ternovyi Y. H., Zubchenko Yu. V. (2017). Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Materials and Technologies*. **23**(4). P. 27–32.
12. Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Yu. V., Asnis Yu. A., Zubchenko Yu. V., Ternovyi E. G., Volkov V. S., Kostyuk B. D., Umanskii V. P. (2018). New electron beam gun for welding in space. *Science and Technology of Welding and Joining*. **20**. 1–7.

REFERENCES

1. Bashenko V. V., Vikhman V. B. (2008). The state and prospects of the development of electronically. Raming welding. Technologies and equipment of electron-beam welding. *Materials I S.-Petersb. Int. Scientific and Technology, Off.*, May 19–22, 2008. St. Petersburg: Vit-Print, 5–21 [in Russian].
2. Bondarev A. A., Rabkin D. A. (1974). Evaporation of easily fluent elements during electron-beam welding of aluminum alloys. *Automatic welding*, № 3 (252), 13–16 [in Russian].
3. Bondarev A. A., Ternovoy E. G. (2010). Features of the formation of seams and properties of joints of aluminum and magnesium alloys under conditions simulating space conditions. *Automatic welding*, № 11, 22–27 [in Russian].
4. Ishchenko A. Ya., Labur T. M. (2013). *Welding of modern structures from aluminum alloys*. Kyiv: Naukova Dumka, 414 p. [in Russian].
5. Olshanskaya T. V., Salomatova E. S. (2016). Review of modern methods of electron beam control in electron beam welding. *News PNIP U. Engineering, materials science*, **18**, № 4.
6. Paton B. E., Lapchinsky V. F. (1998). *Welding and related technologies in space. Peculiarities and Prospects*. Kyiv. Naukova dumka, 182 p. [in Russian].
7. Rabkin D. M. (1986). *Metallurgy of fusion welding of aluminum and its alloys*. Kyiv: Naukova Dumka, 256 p. [in Russian].
8. Solovyov V. G., Lankin Yu. M., Romanova I. Y. u. (2022). Sweep programming electronic beam for heat treatment welding. *Automatic welding*, № 4, 1–7.
9. Ternovyi Y. G., Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Y. A., Zubchenko Yu. V., Statkevych I. I. (2019). Complex of equipment for electron-beam welding in Moon surface conditions. *7 Int. conf. "Space technologies: present and future"*: Abstracts reports. Dnipro, 113 [in Ukrainian].
10. Ternovyi Y. G., Lobanov L. M. (2019). Features of electron-beam welding of thick-walled shells made of aluminium alloys. *7 Int. conf. "Space technologies: present and future"*: Abstracts reports. Dnipro, 93 [in Russian].
11. Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Yu. A., Ternovyi Y. H., Zubchenko Yu. V. (2017). Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Materials and Technologies*, **23**(4), 27–32 [in Ukrainian].
12. Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Yu. V., Asnis Yu. A., Zubchenko Yu. V., Ternovyi E. G., Volkov V. S., Kostyuk B. D., Umanskii V. P. (2018). New electron beam gun for welding in space. *Science and Technology of Welding and Joining*, **20**, 1–7.

Стаття надійшла до редакції 14.06.2023

Після доопрацювання 14.02.2024

Прийнято до друку 24.02.2024

Received 14.06.2023

Revised 14.02.2024

Accepted 24.02.2024

L. M. Lobanov, Deputy Director, Dr. Techn. Sciences, Prof., Acad. NAS of Ukraine. Honored Worker of Science and Technology of Ukraine (2004), Gold Medal. B. Paton "For outstanding achievements in the creation of innovative scientific and technical developments that have found wide practical use" (2022)

ORCID: 0000-0001-9296-2335

E-mail: office@paton.kiev.ua

Yu. M. Lankin, Doctor of Techn. Sci., Senior Researcher, collaborator

ORCID: 0000-0001-6306-8086

E-mail: lankin.u.n@gmail.com

Y. H. Ternovyi, Deputy Head of Department "Space Technologies"

ORCID: 0000–0002–4323–0944

E-mail: ev-geo@ukr.net

N. V. Piskun, Head Department “Space Technologies”, Dr. Techn. Sci.

ORCID: 0000-0003-1459-2310

E-mail: nadamova54@gmail.com

S. O. Hlushak, Researcher, collaborator

ORCID: 0000-0003-4518-7262

E-mail: electriber@ukr.net

V. G. Solovyov, Senior Researcher, collaborator, Cand. Techn. Sci.

ORCID: 0000-0002-1454-7520

E-mail: hsova@gmail.com

V. F. Semikin, Senior Researcher, Cand. Techn. Sci.

ORCID: 0000-0002-7407-5887

E-mail: semikin@paton.kiev.ua

V. E. Fedorchuk, Senior Researcher, collaborator

ORCID: 0000-0002-9929-3231

E-mail: fedorchuk@paton.kiev.ua

I. I. Statkevych, Researcher, collaborator

ORCID: 0000-0001-9403-2123

E-mail: statkevich_igor@ukr.net

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

11, Kazimir Malevich Str., Kyiv, 03150 Ukraine

ELEMENTS OF TECHNOLOGY OF ELECTRON BEAM WELDING OF ALUMINUM ALLOYS FOR INSTALLATION AND REPAIR AND RESTORATION WORK ON THE SURFACE OF THE MOON

The exploration of the Moon cannot be carried out without the creation of long-term lunar bases (LB), as well as other objects that ensure the livelihoods and work of expeditions. These can be assembly and assembly operations during the creation of space complexes or repair and maintenance work related to ensuring the duration of operation of existing systems. Experiments on automatic welding in space, which were carried out on the “Vulkan” equipment, as well as welding with the manual electron beam tool «URI» in outer space, showed that electron beam welding (EBW) is the optimal technological process for performing welding work in space conditions. In this process, the effective efficiency is 85–90 %, which is the maximum compared to other welding methods. EBW in the conditions of terrestrial gravity allows us to ensure the mechanical and chemical properties of welded joints, as well as their density almost at the level of the base metal of the structure, which is impossible with other welding methods. Thus, the strength coefficient of the weld metal of welded joints from aluminum alloys obtained by EBW is 0.85...0.93, and with arc and plasma-arc methods, it is 0.7...0.8. At the same time, obtaining such properties of welded joints in space conditions is difficult. Of course, reduced gravity, low temperatures, and ultra-high vacuum, which are the natural environment on the lunar surface, contribute to the formation of internal leaks in the form of pores in welds (PW). This is primarily manifested in the welding of aluminum alloys, which are used as the main material in spacecraft structures. To obtain high-quality welded joints and exclude such defects as pores, cracks, and non-fusion of edges in the weld roots to be welded, a system of equipment for periodic deflection of the electron beam with a programmable heating intensity along a given trajectory was developed and manufactured.

As a result of technological work carried out using a complex of equipment with a discrete deviation of the electron beam, welded joints (WJ) were obtained from alloys AMg6, Al570, and 1201 with a thickness of 2 to 8 mm. The obtained PW was subject to visual inspection and X-ray control to determine external and internal defects in the WJ. Also, mechanical tests for the strength of resistance by tearing were carried out, the chemical composition was determined, and metallographic studies of PW obtained by the proposed method were performed. The results of the tests and studies showed the high quality of PP from aluminum alloys obtained by EBW using a discrete deflection of an electron beam with a programmable heating intensity along a given trajectory.

The purpose of this work was to analyze the methods of degassing the molten metal of the weld pool, as well as the development and testing of the elements of the technological process of the EBW of aluminum alloys using the created equipment, which, when performing installation and repair and restoration work on the surface of the moon, will allow us to obtain high-quality WJ that meets the requirements for space designs.

Keywords: long-term lunar bases (LB), ultra-high vacuum, low temperatures, electron beam welding (EBW), aluminum alloys, welded joints, defects in seams, leaks, pores, discrete electron beam deflection, scan, combined focusing, X-ray flaw detection, mechanical properties, spectral analysis, chemical composition, macrostructure, microstructure, base metal, weld metal, thermal exposure zone (ZTE), microhardness.