

ВПЛИВ СТРУМУ ФОКУСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПРОМЕНЮ НА ГЕОМЕТРІЮ ТА МІКРОСТРУКТУРУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 2219

М.О. Русиник¹, В.М. Нестеренков¹, М. Sahul², І.М. Клочков¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: nesterenkov17@gmail.com
²Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Technická 4, 160 00 Prague 6, Czech Republic

Досліджено вплив струму фокусування електронно-променевого зварювання на характер формування зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219. Встановлено, що при збільшенні струму фокусування зростає ширина лицьового шва. А ширина кореня шва залежить від реального положення фокусу електронного пучка відносно гострого фокусу на поверхні металу (639 мА). Виявлена залежність струму фокусування на розподіл міді та алюмінію в металі шва. Збільшення струму фокусування з 629 до 649 мА призвело до збільшення вмісту міді у міждендритних ділянках. Енергодисперсійний рентгенівський аналіз показав, що мікроструктура зварного з'єднання, отриманого при струмі фокусування 629 мА, складається з екваксіальних дендритів зі вкрапленими дрібними частками, порами та евтектикою $\alpha+\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$, відокремленими в міждендритних областях. Бібліогр. 9, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, складально-зварювальне оснащення, сплав алюмінію, енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія, сегрегація

Алюмінієвий сплав 2219 є високоміцним сплавом, що складається з алюмінію, міді та марганцю і поєднує в собі добру оброблюваність і якісні механічні властивості. Вироби зі сплаву можуть використовуватися у температурному діапазоні від -270 до 300 °С. При цьому сплав має більш високі механічні властивості порівняно з деформованими сплавами системи легування Al–Mg [1]. Цей сплав є легким металевим матеріалом з кількома бажаними властивостями: низькою щільністю, високою питомою міцністю та жорсткістю. Тому він широко використовується в автомобільній, авіаційній, аерокосмічній та інших галузях промисловості, де потрібні легкі конструкції [2]. Особливе розповсюдження у використанні сплаву 2219 знайшла аерокосмічна галузь, а саме виготовлення корпусів ракет, паливних баків, елементів шасі та інших вузлах конструкцій.

При зварюванні сплавів системи Al–Cu–Mg труднощі викликає велика схильність металу шва до утворення пор і кристалізаційних тріщин (особливо характерних для сплавів на основі алюмінію). При зварюванні сплавів підвищеної міцності спостерігається поява холодних тріщин. Значна усадка при кристалізації зварного шва, а також високий коефіцієнт лінійного розширення призводять до істотних залишкових деформацій. При зварюванні нагартованого алюмінію та термічно зміцнених алюмінієвих сплавів знижується міцність зварного з'єднання порівняно з міцністю основного металу, що створює певні проблеми. Істотні складнощі виникають внаслідок легко-

го окиснення алюмінію у твердому та розплавленому станах. Утворена тугоплавка плівка оксиду алюмінію Al_2O_3 перешкоджає формуванню шва і є джерелом неметалічних включень у металі шва.

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) порівняно до інших типів зварки таких типів сплавів має кілька переваг. Процес зварки відбувається у вакуумі, що є важливим для хімічно-активних сплавів. Також особливістю є швидкий процес нагріву та охолодження металу, що в свою чергу обумовлює мінімальне розміщення зварних з'єднань та максимальний рівень їх міцнісних властивостей. Тимчасові внутрішні напруги не встигають вплинути на метал, що кристалізується, тобто не встигають виникнути кристалізаційні тріщини. Для високоміцних алюмінієвих сплавів можна уникнути розміщення металу в навколошовній зоні при високих швидкостях зварювання, що забезпечують мінімальний термічний вплив на основний метал [3]. Застосування ЕПЗ дозволило зменшити об'єм розплавленого металу зварювальної ванни та розміри зони термічного впливу, це призвело до зниження темпу наростання пружно-пластичних деформацій у температурному інтервалі крихкості та підвищенню запасу технологічної міцності матеріалу, що зварюється [4, 5].

Для отримання зварних з'єднань з необхідними властивостями необхідно оптимізувати параметри ЕПЗ. Струм фокусування є одним із основних параметрів ЕПЗ, що впливає на положення фокуса і, таким чином, на загальну щільність потужності, створювану електронним променем на

В.М. Нестеренков – <http://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, М.О. Русиник – <https://orcid.org/0000-0002-7591-7169>,

І.М. Клочков – <https://orcid.org/0000-0001-6490-8905>

© М.О. Русиник, В.М. Нестеренков, М. Sahul, І.М. Клочков, 2023

поверхні матеріалів, що зварюються. До теперішнього часу відсутня інформація про дослідження впливу струму фокусування на мікроструктуру та механічні властивості сплаву AA2219, звареного електронним променем. Тільки окремі автори досліджували вплив положення фокусу та кута падіння променя на поведінку розплавленої ванни у зварювальному сплаві AA2219. Встановлено, що найменша пористість у зварних швах зі сплаву AA2219 спостерігалася при застосуванні фокусу нижче поверхні зварювального металу на 8 мм [6]. На даний момент інших результатів досліджень сплаву, що розглядається в роботі, не відомо. Дослідження та отримані результати є унікальними та сприяють поясненню впливу струму фокусування на геометрію та мікроструктуру зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219.

Метою даної роботи є дослідження впливу струму фокусування ЕПЗ на геометрію та мікроструктуру зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219 при сталій погонній енергії зварювання та прискорюючій напрузі.

Методика виконання роботи. Для дослідження були використані пластини сплаву алюмінію 2219, завтовшки 10 мм.

Хімічний склад основного матеріалу алюмінієвого сплаву 2219 вимірювали за допомогою рентгенівської флуоресцентної спектроскопії. Для вимірювань використовувався портативний X-гау аналізатор Delta line фірми Innov-X. Хімічний склад вимірювали в трьох різних місцях і розраховували середні значення. Результати XRF наведені в табл. 1. Невелика кількість цирконію (0,1 мас. %) викликає зміну зерна, а саме, зменшує розмір зерна сплаву.

Точковий EDS аналіз локального хімічного складу проводили в рівновісній зоні поблизу межі проплавлення для зварних з'єднань, отриманих при фокусуванні струмів 629 і 649 мА.

Хімічний склад був аналізований за допомогою методу енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS): JEOL 7600F SEM FEG з аналізатором X-max 50 mm² від компанії Oxford Instruments.

Процес зварювання відбувався на електронно-променевої зварювальній установці типу УЛ-209М.

Конфігурація установки передбачає руху внутрішньокамерну зварювальну гармату з комп'ютерним числовим управлінням (ЧПУ) переміщення консольного типу. Цей механізм забезпечує лінійний рух уздовж трьох декартових координатних осей (уздовж камери – X, поперек – Y

і вертикально – Z), а також нахил гармати під кутом 90° в площині Z-X (від «вертикального» положення гармати до «горизонтального»). При цьому цей «нахил» здійснюється шляхом повороту всієї консольної балки, що є основою механізму переміщення по осі Y. Сама балка при цьому може вільно рухатися в площині Z-X в межах більшої частини габариту зварювальної камери.

Блок зварювальної гармати може мати додаткову ступінь свободи – ось повороту гармати в площині, паралельній осі Y – зазвичай на ±45° (тобто ось цього повороту перпендикулярна осі Y).

Установки цього типу комплектуються високоевольтним зварювальним джерелом потужністю 15, 30 або 60 кВт (при прискорюючій напрузі 60 кВ) в залежності від конкретних матеріалів, які підлягають зварюванню, та їх товщини.

Для зварювання пластин різних розмірів було розроблено складально-зварювальне оснащення, на якому була зварена партія стикових з'єднань з наскрізним проплавленням при різних параметрах зварювання.

Відомо, що через високу теплопровідність алюмінію особливі вимоги пред'являються до типів зварних з'єднань. Рівномірне формування швів досягається лише при симетричному розташуванні джерела нагріву по відношенню до зварюваних кромок. При цьому була обрана схема ЕПЗ горизонтальним променем в горизонтальній площині (рис. 1). Таке розташування зварювальної ванни полегшує дегазацію рідкого металу та його рафінування, що в свою чергу знижує вимоги до чистоти і якості підготовки поверхонь, що стикуються.

Результати досліджень. На першому етапі розглянуто вплив струму фокусування на форму та геометрію швів. Для цього були обрані наступ-

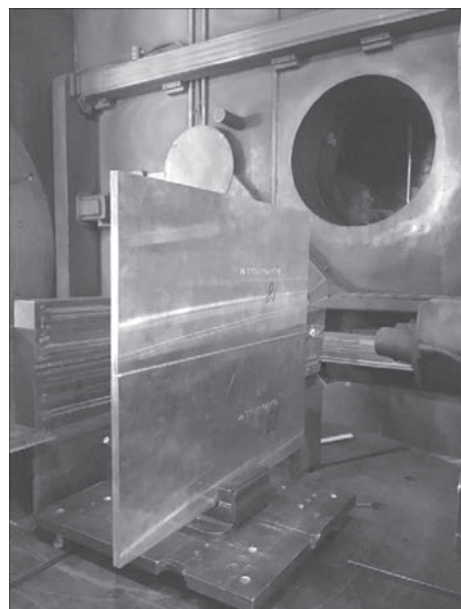


Рис. 1. Схема ЕПЗ горизонтальним променем в горизонтальній площині

Таблиця 1. Хімічний склад пластин зі сплаву 2219, мас. %

Al	Cu	Mn	V	Fe	Si	Zn	Zr	Ti
Основа	6,23	0,32	0,09	0,13	0,28	0,03	0,1	0,07

Таблиця 2. Параметри зварювання пластин зі сплаву 2219

Зразок	Струм зварювання, мА	Швидкість зварювання, мм/с	Напруга прискорення, кВ	Струм фокусування, мА	Погонна енергія, Дж/мм
1	85	20	60	629	255
2	85	20	60	634	255
3	85	20	60	639	255
4	85	20	60	644	255
5	85	20	60	649	255

ні режими зварки (табл. 2). На цих режимах було зроблено зварювання пластин сплаву 2219.

Зварювання провели з різними струмами фокусування (табл. 2), а саме: 629, 634, 639, 644, 649 мА, де значення 639 мА – є гострим фокусом, тобто струм фокусування знаходиться на поверхні пластини, що зварюється (рис. 2, *d, e*). Для дослідження обрали зварні шви з мінімальним 629 мА та максимальним 649 мА струмами фокусування. Інші параметри (струм зварювання, швидкість зварювання та ін.) не змінювалися.

На рис. 3 зображено поперечні перерізи зварних швів, отриманих на різних струмах фокусування. За даним знімком можна оцінити пропорційність ширини шва до його довжини.

Вимірювання показали, що ріст ширини лицьової частини шва прямо пропорційний росту струму фокусування. Проте, стосовно кореня цього сказати не можна. При менших значеннях струму фокусування ширина кореня менша ніж при гострому фокусі. Але вже при значно більших значеннях струму фокусування ширина кореня зменшується (рис. 4).

Для аналізу мікроструктури зварних швів використовували методи скануючої електронної мікроскопії (SEM) та енергодисперсійний рентгенівський спектроскоп (EDS).

Мікроструктура базового металу з алюмінієвого сплаву AA2219 представлена на рис. 5. Мікроструктура сплаву складається з витягнутих зерен твердого розчину алюмінію (α); дрібних та крупних яскравих частинок, розподілених головним чином на межах зерен. На зображенні, отриманому за допомогою зворотних електронів (BSE), значна різниця яскравості між частинками та матрицею свідчить про наявність важких елементів. Згідно з хімічним складом базового металу, цим елементом вважається мідь. Крім того, наявність

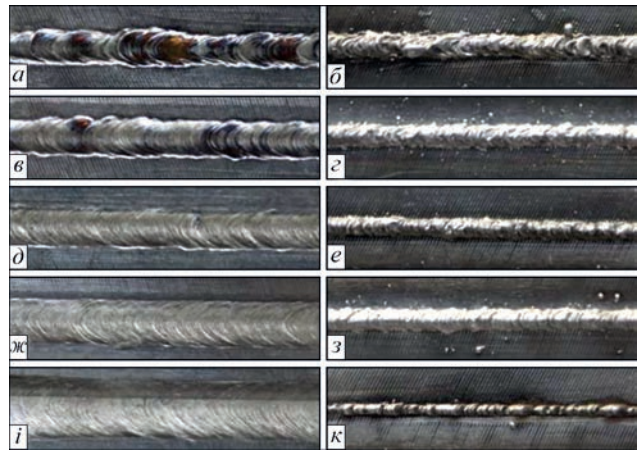


Рис. 2. Лицевий та кореневий вигляд зварних швів, отриманих при різних значеннях струму фокусування, мА: *a, б* – 629; *в, в* – 634; *d, e* – 639 – гострий фокус; *ж, з* – 644; *i, к* – 649 мА була підтверджена за допомогою кількісного та якісного аналізу EDS.

Мікроструктура зварного з'єднання, отриманого при струмі фокусування 629 мА, складається з екваксіальних дендритів з вкрапленими дрібними частками, порами та евтектикою $\alpha+\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$, відокремленими в міждендритних областях (рис. 6). Локальний елементний склад, що був вимірний з чотирьох областей (Спектри 1-4) наведено в табл. 3. Спектри 1 та 3 були отримані з міждендритних областей, збагачених відокремленими легуючими елементами. У порівнянні з дендритами, ці зони виглядають яскравіше і містять близько 14 ат. % міді. Згідно з бінарною діаграмою алюміній-мідь можна ідентифікувати евтектику, що складається з $\alpha(\text{Al}) + \theta(\text{Al}_2\text{Cu})$. У Спектрі 2 спостерігалось зниження вмісту міді та збільшення вмісту алюмінію. Вміст алюмінію, виявлений у Спектрі 2, становив 93,7 ат. %. Найбільша кількість алюмінію була виміряна в області, позначеній як Спектр 4, де було виявлено 95,4 ат. % алюмінію.

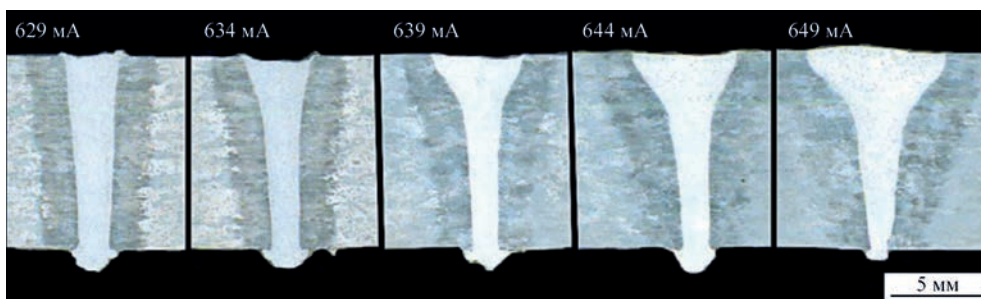


Рис. 3. Вплив струму фокусування на геометрію зварних швів

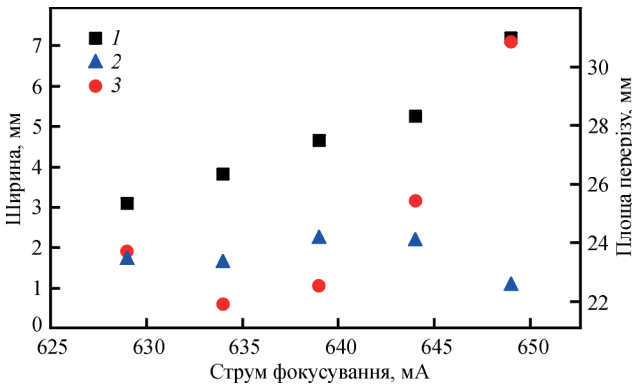


Рис. 4. Залежність ширини лицевого шва (1), кореня шва (2) та площі перерізу (3) від величини струму фокусування

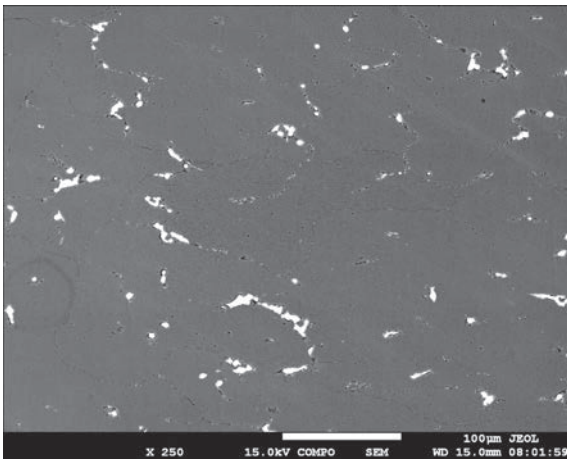


Рис. 5. Мікροструктура основного металу сплаву 2219

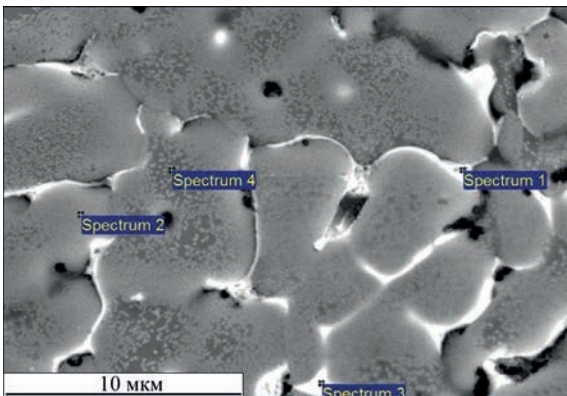


Рис. 6. Мікροструктура металу шва (струм фокусування 629 мА)

Згідно з бінарною фазовою діаграмою Al–Cu, при однорідній кристалізації у сплаві міститься близько 2,36 % евтектики α (Al) + θ (Al₂Cu). Однак процес кристалізації під час зварювання зазвичай є неоднорідним. Це призводить до мікросегрегації Cu. Тому кількість евтектики у зварному з’єднанні вище 2,36 %, а вміст Cu в матриці α (Al) нижче 5,65 % [7].

Таблиця 3. Хімічний склад металу шва за EDS аналізом (струм фокусування 629 мА) (ат. %)

Спектри	O	Al	Mn	Fe	Cu
1	6,05	79,43	0,14	0,27	14,10
2	2,65	93,72	0,17	–	3,46
3	3,21	82,15	0,22	0,37	14,06
4	3,15	95,40	0,13	–	1,32

Аналіз EDS, проведений у металі зварного шва зі струмом фокусування 629 мА відповідно до обраних областей наведений у табл. 3.

Мікροструктура зварного з’єднання, отриманого при струмі фокусування 649 мА, наведена на рис. 7 та табл. 4. Дендритна мікροструктура утворилася після кристалізації ванни розплаву. Локальний хімічний склад вимірювали в спектрах 1–6. Спектри 1 та 4 являли собою дендрити з високим вмістом алюмінію. Так, у цих спектрах було виміряно більше 95 ат. % алюмінію. У цьому випадку реєстрували твердий розчин алюмінію. Збільшення вмісту міді спостерігалось в спектрах 2 та 5. На зображенні електронів зворотного розсіювання ці місця були трохи яскравішими порівняно з попередніми. Вміст міді, який спостерігався в цих місцях, становив 4,6 та 4,7 ат. % відповідно. Найяскравіші зони в наплавленому металі спостерігалися у 3 та 6 спектрах. У таких місцях спостерігалося значне збільшення вмісту міді. З іншого боку, падіння вмісту алюмінію спостерігалося у вищезгаданих спектрах 3 та 6. Спектр 3 характеризувався вмістом близько 19,7 ат. % міді. У Спектрі 6 було виявлено 22,8 ат. % міді. Це пов’язано зі сегрегацією, коли міждендритні ділянки збагачуються легуючими елементами, в нашому випадку, це в основному мідь. Евтектика, що складається з α (Al) + θ (Al₂Cu), може бути виділена в цьому місці, як це впливає з вищезгаданої бінарної діаграми. Крім того, у Спектрах 3 і 6 також було зафіксовано залізо.

Висока швидкість охолодження, характерна для ЕПЗ, не тільки сприяє мікросегрегації, але також покращує розчинність Cu в Al, яка зазвичай

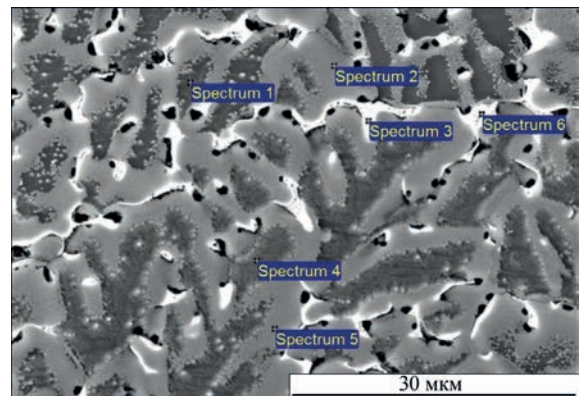


Рис. 7. Мікροструктура металу шва (струм фокусування 649 мА)

Таблиця 4. Хімічний склад металу шва за EDS аналізом (струм фокусування 649 мА) (ат. %)

Спектри	O	Al	Mn	Fe	Cu
1	2,00	96,78	0,14	–	1,08
2	0,37	94,91	0,13	–	4,59
3	7,90	71,96	0,14	0,33	19,67
4	2,74	95,57	0,15	–	1,54
5	0,57	94,57	0,18	–	4,67
6	3,95	72,86	0,11	0,31	22,79

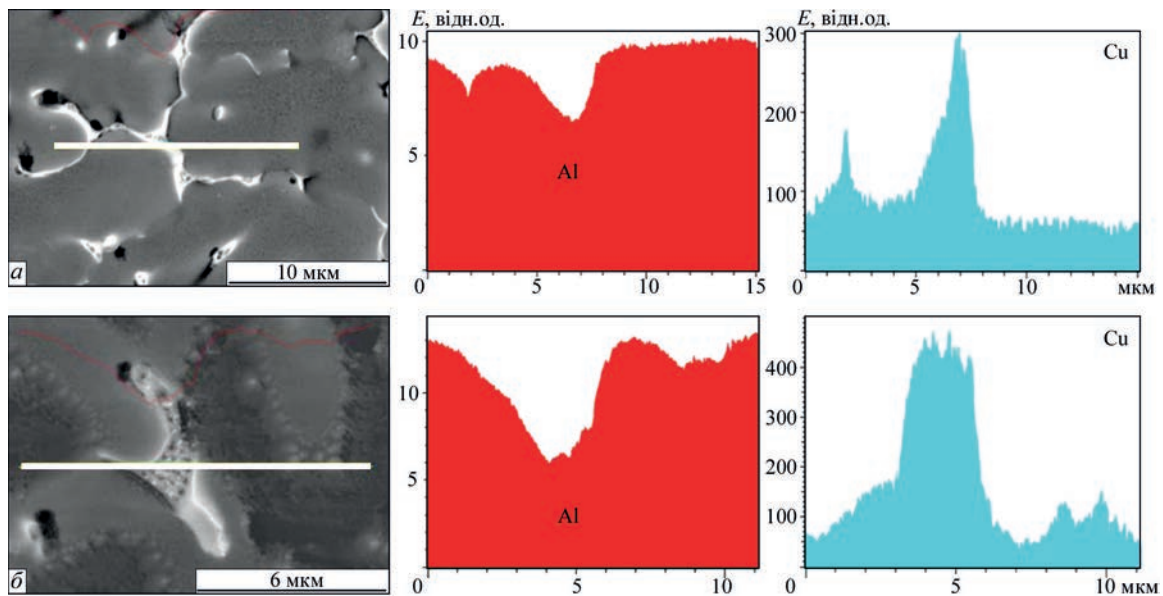


Рис. 8. EDS лінійне сканування крізь дендритні зони, в металі швів, отриманих з використанням струму фокусування: а – 629; б – 649 мА

становить менше 2 % в умовах рівномірного процесу кристалізації. Крім того, виявили [8], якщо струм збільшується, то більша кількість міді дифундує у тверду речовину. За нашими спостереженнями, збільшення струму фокусування з 629 до 649 мА призвело до збільшення вмісту Cu в міждендритних ділянках. Однак, при більш високому вмісті Cu на границях зерен чутливість до гарячих тріщин може значно зрости.

«Лінійне сканування» EDS по міждендритних ділянках проводили в металі швів, отриманих з використанням струмів фокусування 629 мА (рис. 8, а) та 649 (рис. 8, б). Розміщення алюмінію і міді спостерігалось поперек білих ліній, наведених на (рис. 8 а, б). У міждендритній області фіксувалось чітке збільшення Cu та сильне зниження Al. Це явище пов'язане з наявністю мікросегрегованої евтектики в міждендритних областях. Наявність евтектики також було підтверджено локальним кількісним аналізом EDS.

Висновки

1. Досліджено вплив струму фокусування електронно-променевого зварювання на формування швів алюмінієвого сплаву 2219 для пластин товщиною до 20 мм. Установлено, що при збільшенні струму фокусування зростає ширина лицьового шва. В свою чергу ширина кореня шва залежить більше від реального положення фокусу електронного пучка відносно гострого фокусу (639 мА).

2. Виявлена залежність струму фокусування на розподіл міді та алюмінію в металі шва. Збільшення струму фокусування з 629 до 649 мА призвело до збільшення вмісту міді у фазових виділеннях, які розміщені у міждендритних ділянках. Збільшення вмісту міді призвело до утворення

евтектики у зазначених міждендритних ділянках. На ділянках спектрів, де фіксувалось зменшення вмісту алюмінію, спостерігалось і збільшення вмісту міді, що пов'язано з сегрегацією.

3. За допомогою енергодисперсійного рентгеновського аналізу визначена мікроструктура металу шва при різних струмах фокусування. Так більш крупні дендрити утворюються при розширенні шва, що в досліджуваному діапазоні фокусування пучка відповідає більшій величині струму фокусування.

4. Локальним кількісним аналізом EDS підтверджено наявність евтектики $\alpha+\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ в міждендритних областях металу шва.

Список літератури

1. Виноградова Н.М., Старостина З.И., Иванова Т.В. (1975) Алюминиевые свариваемые сплавы 1201 и 01381 для работы при низких температурах. *Алюминиевые сплавы*, 7, 65–71.
2. Heinz, A.; Haszler, A.; Keidel, C. et al. (2000) Recent development in aluminum alloys for aerospace application. *Mater. Sci. Eng.*, **280**, 102–107.
3. Скальський В.Р., Андрейків О.С. (2006) *Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емисії*. Львів, Видавничий центр Львів. нац. ун-ту ім. І. Франка.
4. Терновой Е.Г., Бондарев А.А. (2012) Электронно-лучевая сварка алюминиевых сплавов АМгб и М40. *Автомат. сварка*, **4**, 8–14.
5. Бондарев А.А. (1984) Состояние техники и преимущества процесса электронно-лучевой сварки конструкций из алюминиевых сплавов. *Сб. тр. Советско-американского семинара. Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения*, 1984, Киев, 10–19.
6. Yang, Z.; He, J. (2021) Numerical investigation on fluid transport phenomena in electron beam welding of aluminum alloy: Effect of the focus position and incident beam angle on the molten pool behavior. *Int. J. Therm. Sci.* 164, 106914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106914>
7. Quan, Li, Ai-ping, Wu, Yan-jun, Li, et al. (2017) Segregation in fusion weld of 2219 aluminum alloy and its influence on mechanical properties of weld. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27 (2), 258–271. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60030-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60030-X)
8. Ruwei, Geng, Jun, Du, Zhengying, Wei et al. (2020) Multiscale modelling of microstructure, micro-segregation, and local mechanical properties of Al–Cu alloys in wire and

arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 36, 101735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101735>

9. Покляцький А.Г., Мотруніч С.І., Клочков І.М., Лабур Т.М. (2021) Деякі переваги зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 1201, отриманих тертям з перемішуванням. *Автомат. зварювання*, 9, 19–23.

References

1. Vinogradova, N.M., Starostina, Z.I., Ivanova, T.V. (1975) Aluminium weldable alloys 1201 and 01381 for operation at low temperatures. *Aluminium alloys*, 7, 65–71 [in Russian].
2. Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C. et al. (2000) Recent development in aluminum alloys for aerospace application. *Mater. Sci. Eng.*, 280, 102–107.
3. Skalskyi, V.P., Andreikiv, O.Ie. (2006) *Evaluation of bulk damage of materials by acoustic emission method*. Lviv, Vydavn. Tsentr Nats. Un-tu [in Ukrainian].
4. Ternovoj, E.G., Bondarev, A.A. (2012) Electron beam welding of aluminium AMg6 and M40 alloys. *The Paton Welding J.*, 4, 8–14.
5. Bondarev, A.A. (1984) State-of-the-art and advantages of electron beam welding process of aluminium alloy structures. In: *Proc. of Soviet-American Seminar on Welding of Aluminium Alloys of Cryogenic and General Purpose*. Kyiv, 10–19.
6. Yang, Z., He, J. (2021) Numerical investigation on fluid transport phenomena in electron beam welding of aluminum alloy: Effect of the focus position and incident beam angle on the molten pool behavior. *Int. J. Therm. Sci.* 164, 106914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106914>
7. Quan, Li, Ai-ping, Wu, Yan-jun, Li, et al. (2017) Segregation in fusion weld of 2219 aluminum alloy and its influence on mechanical properties of weld. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27 (2), 258–271. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60030-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60030-X)
8. Ruwei, Geng, Jun, Du, Zhengying, Wei et al. (2020) Multiscale modelling of microstructure, micro-segregation, and local mechanical properties of Al–Cu alloys in wire and arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 36, 101735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101735>
9. Poklyatskyi, A.G., Motrunich, S.I., Klochkov, I.M., Labur, T.M. (2021) Some advantages of welded joints of aluminium 1201 alloy produced by friction stir welding. *The Paton Welding J.*, 9, 15–19.

INFLUENCE OF ELECTRON BEAM FOCUSING CURRENT ON GEOMETRY AND MICROSTRUCTURE OF WELDED JOINTS OF ALUMINIUM 2219 ALLOY

M.O. Rusynyk¹, V.M. Nesterenkov¹, M. Sahul², I.M. Klochkov¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: nesterenkov17@gmail.com

²Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Technická 4, 160 00 Prague 6, Czech Republic

The impact of the focusing current of electron beam welding on the nature of the formation of welded joints of aluminium 2219 alloy was investigated. It was established that when the focusing current increases, the width of the facial weld grows. And the width of the weld root depends on the real position of the electron beam focus relative to a sharp focus on the metal surface (639 mA). Dependence of the focusing current on the distribution of copper and aluminium in the weld metal was revealed. An increase in the focusing current from 629 to 649 mA led to an increase in the copper content in the interdendritic regions. Energy dispersive X-ray analysis showed that the microstructure of the welded joint produced at the focusing current of 629 mA, consists of equiaxial dendrites with embedded small particles, pores and α - θ -Al₂Cu eutectic, separated in the interdendritic regions. 9 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: electron beam welding, assembly and welding equipment, aluminium alloy, energy dispersive X-ray spectroscopy, segregation

Надійшла до редакції 25.05.2023



**УДС-77 РЕЙКОВИЙ
УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ДЕФЕКТОСКОП**
Розробник Асоціація «ОКО»