

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ШИРИНУ ЗОНИ ЗНЕМІЦНЕННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 2219

В.В. Скрябінський, В.М. Нестеренков, М.О. Русиник, В.І. Загорніков, О.І. Гончаренко, І.М. Клочков

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: skriabinski.vv.555@gmail.com

При електронно-променевому зварюванні сплаву 2219 зниження характеристик міцності з'єднань може становити до 50 % по відношенню до основного металу. З метою забезпечення рівномірності конструкції місця розташування зварних швів вибирають на потовщених ділянках. При цьому ширина потовщеної ділянки повинна бути більшою за ширину зони знеміцнення зварного з'єднання. Ця зона включає литу зону та зону термічного впливу, в якій відбулося зниження міцності основного металу. Досліджено вплив швидкості зварювання та використання технологічних накладок на ширину литої зони та зони термічного впливу, тобто на ширину зони знеміцнення при електронно-променевому зварюванні плит сплаву 2219. Встановлено, що збільшення швидкості зварювання з 10 до 20 мм/с зменшує ширину ділянки знеміцнення приблизно вдвічі. Використання технологічної накладки дозволяє зменшити ширину зони знеміцнення ще приблизно на 20 %. При цьому зниження шва формується в тілі накладки, після її видалення зварений стик не вимагає подальшої механічної обробки. Розрахунковим та експериментальним шляхами встановлено, що технологічна накладка відсікає периферійну частину електронного променя, що становить близько 5 % від його повної потужності. На практиці вплив цієї периферійної частини призводить до небажаного розширення шва з боку входу променя та до додаткового нагрівання основного металу і, як наслідок, до збільшення розмірів зони знеміцнення. Бібліогр. 11, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, алюмінієвий сплав, зона термічного впливу, зона знеміцнення, технологічна накладка

Вступ. Високоміцний алюмінієвий сплав 2219 системи легування Al–6Cu є термічно зміцнюваним сплавом. Високі механічні властивості таких сплавів досягаються в результаті термічної обробки, при якій виділяються вторинні фази, що зміцнюють. При зварюванні таких сплавів у зоні термічного впливу (ЗТВ) відбувається розчинення цих фаз, що є причиною зниження характеристик міцності металу. Початок процесу розчинення визначається не лише максимальною температурою нагріву, а й тривалістю знаходження у відповідному температурному інтервалі [1].

Процес електронно-променевому зварюванню (ЕПЗ) характеризується дуже коротким часом термічного циклу з високими швидкостями охолодження та невеликим обсягом розплавленого металу. Це призводить до суттєвого зменшення розмірів ЗТВ [2, 3]. Незважаючи на це, міцність зварних з'єднань залишається досить низькою. Наприклад, навіть при короткочасному нагріванні, яким характеризується ЕПЗ, коефіцієнт міцності з'єднань сплавів Al–6Cu становить 70...75 % [4], а іноді й менше 50 % [5]. З метою забезпечення рівномірності конструкції місця розташування зварних швів вибирають на потовщених ділянках. При цьому ширина потовщеної ділянки повинна

бути більшою за ширину зони знеміцнення зварного з'єднання. З іншого боку, надмірне збільшення ширини таких ділянок призводить до небажаного збільшення загальної ваги конструкції. Зона знеміцнення з'єднання включає литу зону та ЗТВ, в якій відбулося зниження міцності основного металу. Для того, щоб знизити вагу конструкцій, необхідно вибирати режим ЕПЗ, що забезпечує отримання швів з мінімальною шириною литої зони та ЗТВ. Електронно-променеве зварювання дозволяє отримувати такі з'єднання. Висока концентрація енергії дозволяє зварювати метали з високою швидкістю при малому об'ємі зварювальної ванни.

ЕПЗ алюмінієвих сплавів має свої особливості. У багатьох випадках форма проплавлення є клиноподібною [5–8]. Це зумовлено тим, що розподіл густини потужності електронного променя за його перерізом близький до закону нормального розподілу [9]. Центральна частина променя з найбільшою концентрацією енергії проплавляє метал і забезпечує його зварювання. Периферійні частини променя, які потрапляють на кромки металу, що зварюється, розплавляють їх, тим самим збільшуючи ширину шва з боку входу променя. Крім цього, краї цієї периферійної частини променя, у яких

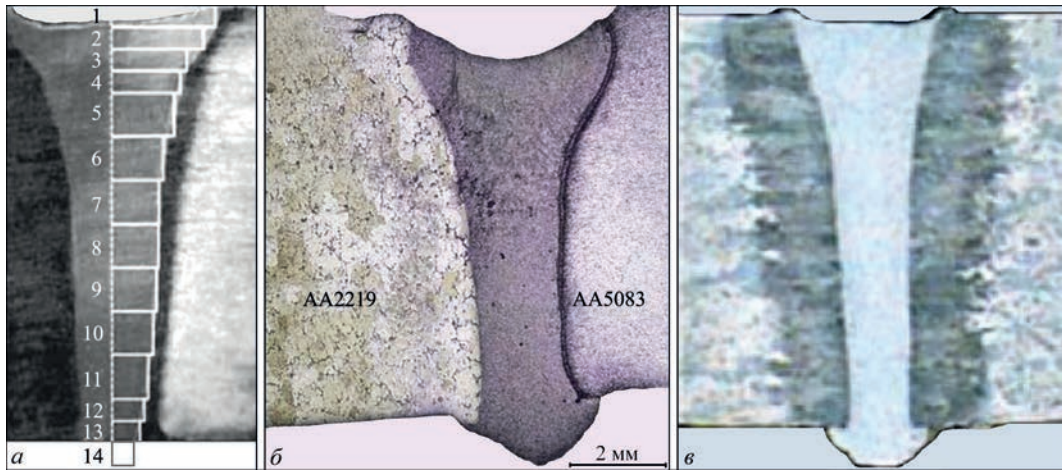


Рис. 1. Типові поперечні перерізи швів при ЕПЗ сплаву Al-6Cu: а – [6]; б – [7]; в – [8]

вже не вистачає потужності для плавлення металу, безпосередньо нагрівають кромки, що зварюються, збільшуючи ширину ЗТВ.

Типові поперечні перерізи з'єднань алюмінієвих сплавів системи Al-6Cu, зварених електронним променем, показані на рис. 1. У всіх випадках з боку входу променя зварні шви ширші, ніж у кореневій частині. Також видно незначне заниження металу шва з боку входу променя.

Метою цієї роботи є визначення технології ЕПЗ плит сплаву 2219, що забезпечує отримання з'єднань з мінімальною шириною зони знеміцнення.

Виклад основного матеріалу. Зварювання проводили на електронно-променевої зварювальній установці УЛ-209М з джерелом живлення ЕЛА 60/60. Твердість металу швів і ЗТВ вимірювали за методом Віккерса, за допомогою твердоміру М-400, фірми «Лесо». Навантаження складало 1Н (100 г), час прикладення навантаження 10 с. Зварювали плити алюмінієвого сплаву 2219 Т8 завтовшки 10 мм. Параметри режимів зварювання (табл. 1) підбирали таким чином, щоб забезпечити повне проплавлення стику за один прохід з формуванням посилення та зворотного валика шва.

Таблиця 1. Режими ЕПЗ плит сплаву 2219

Товщина металу, мм	10	10	10	10	12,2*
Прискорююча напруга, кВ	60	60	60	60	60
Швидкість зварювання, мм/с	10	15	20	25	20
Струм променя, мА	55	70	85	95	95
<i>Примітка.</i> * – 10 мм + накладка завтовшки 2,2 мм.					

У всіх експериментах використовували кругову траєкторію сканування променя при амплітуді 1 мм та частоті розгортки 580 Гц з фокусуванням на поверхні плит, що зварюються. Тобто відносний розподіл густини потужності електронного променя зберігався постійним. Поперечні перерізи швів при ЕПЗ сплаву 2219 при швидкості зварювання 10, 15, 20 та 25 мм/с зображені на рис. 2.

Найширші шви (див. табл. 2) були отримані при зварюванні зі швидкістю 10 мм/с. Литя зона має клиноподібну форму, її ширина з боку входу променя становить 5,5 мм і з боку виходу 1,6 мм. При збільшенні швидкості до 15 мм/с ширина литої зони зменшилася до 3,6 і 1,4 мм відповідно. Подальше збільшення швидкості зварювання на ширину литої зони помітно не вплинуло.

Причиною розширення литої зони з боку входу променя є наявність периферійної частини променя з відносно невисокою густиною потужності. Для того щоб виключити вплив периферійної

Таблиця 2. Ширина литої зони швів залежно від швидкості зварювання

Швидкість зварювання, мм/с	10	15	20	25*	20 (зварювання з накладкою)
Ширина литої зони з боку входу променя, мм	5,5	3,6	3,6	3,6	1,6
Ширина литої зони з боку виходу променя, мм	1,6	1,4	1,4	1,3	1,4
<i>Примітка.</i> (*) – зварний шов з дефектами.					

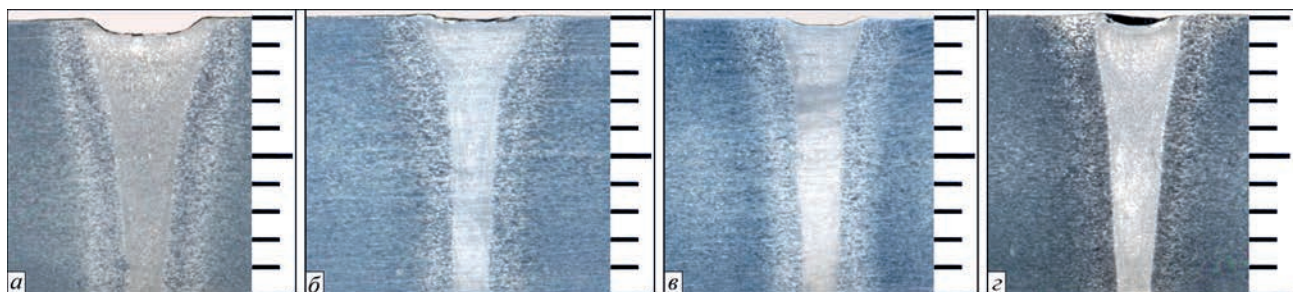


Рис. 2. Поперечні перерізи швів при ЕПЗ сплаву 2219 при швидкості зварювання: а – 10; б – 15; в – 20; г – 25 мм/с

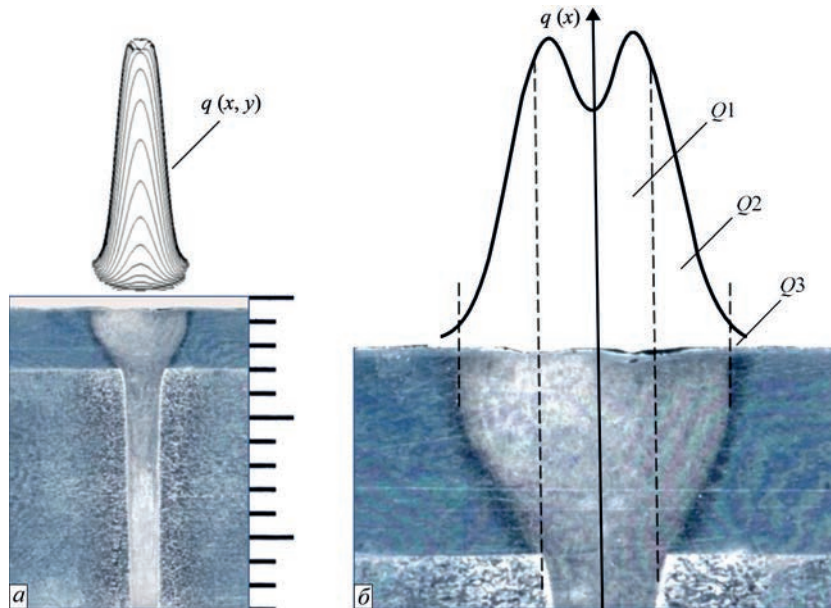


Рис. 3. Розподіл густини потужності променя (а – $q(x, y)$) і б – $q(x)$) та поперечний переріз шва сплаву 2219, звареного з накладкою з того самого сплаву

частини променя на форму проплавлення, використовували технологічний прийом зварювання з накладкою з того ж матеріалу. Такі накладки при зварюванні з повним проплавленням не тільки екранують периферійні частини променя, але й є присадним матеріалом. Заниження шва, що утворюється, формується в тілі накладки. Після зварювання накладка видаляється механічною обробкою.

Було зазначено, що при швидкостях 10, 15 і 20 мм/с процес зварювання відбувається зі стабільним формуванням з'єднання як з лицьової, так і з кореневої частини шва. У разі збільшення швидкості зварювання до 25 мм/с стабільність формування шва порушується. З кореневої частини шва періодично з'являються такі дефекти як підрізи та незначні витікання металу. Тому зварювання з технологічною накладкою проводили на максимальній швидкості, що забезпечує стабільне протікання процесу, тобто при 20 мм/с.

На рис. 3 поперечний переріз шва, звареного з накладкою, схематично об'єднали з об'ємним графіком розподілу густини потужності променя (рис. 3, а) та з поперечним перерізом цього графіка (рис. 3, б). З рисунка видно, що лита зона вузька й має практично прямокутну форму. Ширина литої зони зварного шва під накладкою становить 1,6 мм та з боку виходу променя 1,4 мм при максимальній ширині підплавлення накладки до 5 мм. Повне проплавлення металу, що зварюється, та технологічної накладки забезпечує центральна частина електронного променя з найбільшою концентрацією енергії та потужністю $Q1$. Бічні периферійні частини променя з малою концентрацією енергії

екрануються технологічною накладкою. При цьому вони частково розплавляють (потужність $Q2$) та нагрівають (потужність $Q3$) накладки.

Цікаво визначити, яка частина потужності електронного променя екранується технологічною накладкою. Її можна розрахувати або виміряти експериментально. Розроблений раніше алгоритм розрахунку розподілу густини потужності електронного променя [10] дозволяє розраховувати співвідношення потужностей променя в будь-яких обраних областях обробки. Для розрахунків використовували комп'ютерну програму проєктування розгортки електронного променя [11]. На рис. 4 показано розподіл густини потужності електронного променя з ефективним діаметром 0,5 мм

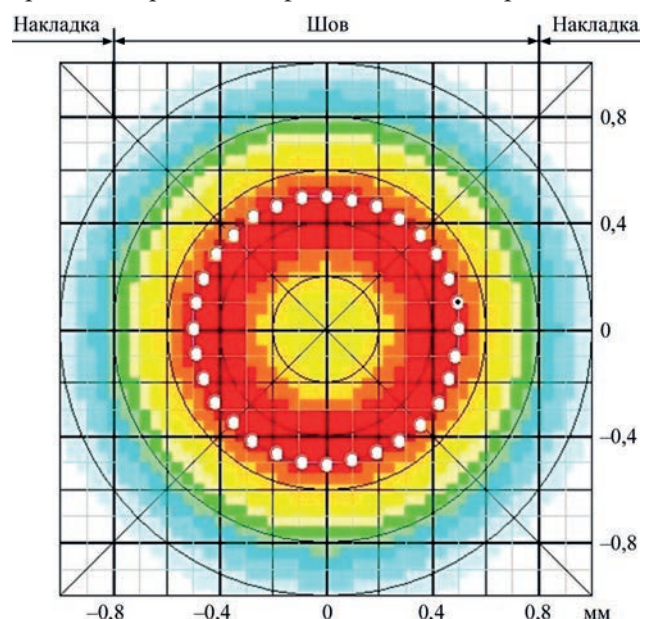


Рис. 4. Кольорове зображення розподілу густини потужності променя $q(x, y)$ на екрані комп'ютера

для розгортки у вигляді кола діаметром 1 мм. Колірорами зображується інтенсивність потужності променя від мінімальної (блакитний колір) до максимальної (червоний).

Частину потужності електронного променя, що припадає на область зварного шва з повним проплавленням ($Q1$, %) можна розрахувати за формулою:

$$Q1(\%) = \frac{100 \iint_{WMe} q(x, y) dx dy}{\iint_{Me} q(x, y) dx dy},$$

де $q(x, y)$ – розподіл густини потужності променя; WMe – область впливу променя, яка припадає на метал зварного шва; Me – вся область електронно-променевої обробки.

Аналогічно можна розрахувати частину потужності променя, що йде на підплавлення ($Q2$, %) та нагрів ($Q3$, %) металу накладки з обох боків зварного шва. Розрахунки показали, що в нашому випадку на зварний шов направлено близько 95 % від потужності електронного променя, а на нагрівання та розплавлення прилеглих до шва частин накладки – близько 2,5 % від потужності променя з кожного боку відповідно.

Експериментально виміряти потужність електронного променя, спрямовану на якусь оброблювану зону, можливо, розташувавши в цій зоні мішень із тугоплавкого металу та вимірявши величину струму, що протікає через мішень. Потужність променя, що екранується накладкою, проводили наступним чином. Молібдєнові пластини завтовшки 6 мм закріплювали в складально-зварювальному пристрої з зазором 1,6 мм між ними. Ширина зазора дорівнювала ширині зварного шва під



Рис. 5. Експериментальне вимірювання потужності променя, що екранується технологічною накладкою

технологічною накладкою. Пластини розміщували на керамічних ізоляторах і фіксували притисками через керамічні ізолятори, як показано на рис. 5.

Цими ізоляторами пластини були електрично ізольовані від зварювальної камери, тобто від «землі». Електричні дроти, приєднані до молібдєнових пластин, виводили з вакуумної камери та через дільники напруги приєднували до «землі». Електричні струми, що проходять через пластини, вимірювали вольтметрами, приєднаними до дільників напруги. Для наведення променя в центр зазора між пластинами використовували базову систему вторинно-електронного відеоспостереження типу RASTR6. Після цього проводили імітацію процесу зварювання на тому режимі, на якому зварювали плити сплаву 2219 з накладною (тобто при струмі променя 95 мА, див. табл. 1). При точному наведенні променя в центр зазора показники вольтметрів під час експерименту збігалися. Під час вимірювання струми пластин коливалися в межах 2,5...3,5 мА. Таким чином, на обидві пластини потрапляло приблизно від 5 до 7 % від загальної потужності променя.

Повна ширина зони знеміцнення зварного з'єднання дорівнюватиме ширині литої зони плюс ширина ЗТВ по обидва боки від неї. Ширину ЗТВ визначали вимірюванням твердості поперечних шліфів зварних з'єднань на відстанях від поверхні плити 1,5 мм з боку входу променя. Крок вимірювань становив 0,3...0,5 мм. Вимірювання починали від центру шва та закінчували через 3...5 мм після виходу на основний метал. Розподіл твердості в поперечних перерізах з'єднань плит сплаву 2219, зварених зі швидкостями 10 та 20 мм/с, показано на рис. 6 і 7.

Твердість металу шва становить 670...710 МПа при твердості основного металу 1350...1360 МПа.

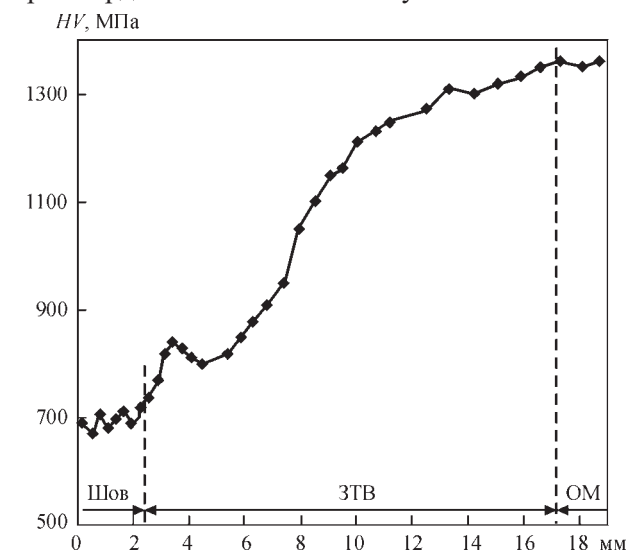


Рис. 6. Розподіл твердості у поперечному перерізі з'єднань плит сплаву 2219, зварених зі швидкістю 10 мм/с

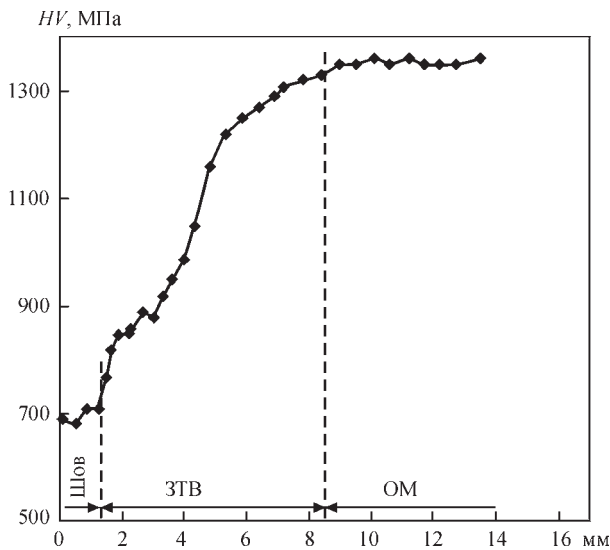


Рис. 7. Розподіл твердості у поперечному перерізі з’єднань плит сплаву 2219, зварених зі швидкістю 20 мм/с

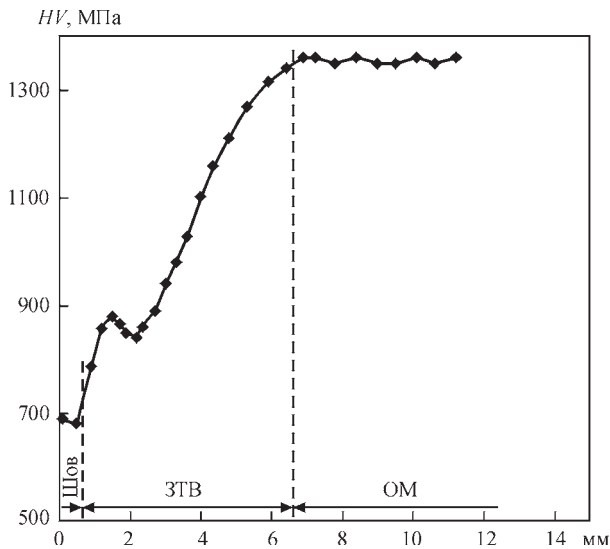


Рис. 8. Розподіл твердості у поперечному перерізі з’єднань плит сплаву 2219, зварених з технологічною накладкою зі швидкістю 20 мм/с

У разі збільшення швидкості зварювання з 10 до 20 мм/с ширина ЗТВ зменшилася з 15 до 7 мм. Видно, що твердість металу на відстані 1 мм від лінії сплавлення на 30...40 МПа вище, ніж твердість, виміряна на відстані 2...3 мм. Це обумовлено частковим гартуванням металу в безпосередній близькості до зварного шва після його нагрівання до температури загартування й подальшого швидкого охолодження. Розподіл твердості у поперечному перерізі з’єднань плит сплаву 2219, зварених з технологічною накладкою, показано на рис. 8.

У табл. 3 наведено залежність ширини ЗТВ та ділянки знеміцнення від швидкості зварювання.

З таблиці видно, що збільшення швидкості зварювання з 10 до 20 мм/с зменшує ширину ділянки знеміцнення практично вдвічі (з 35,5 до 17,6 мм). Подальше збільшення швидкості зварювання недоцільне з-за порушення стабільності формування з’єднання та появи дефектів.

Таблиця 3. Ширини ЗТВ та ділянки знеміцнення залежно від швидкості зварювання та при зварюванні з технологічною накладкою

Швидкість зварювання, мм/с	10	15	20	25*	20 (зварювання з накладкою)
Максимальна ширина литої зони, мм	5,5	3,6	3,6	3,6	1,6
Ширини ЗТВ від лінії сплавлення до основного металу, мм	15	10	7	6	6
Ширини ділянки знеміцнення, мм	35,5	23,6	17,6	15,6	13,6

Примітка. (*) – зварний шов з дефектами формування.

Використання технологічної накладки при ЕПЗ плит алюмінієвого сплаву 2219 завтовшки 10 мм дозволяє зменшити ширину зони знеміцнення з 17,6 до 13,6 мм (тобто близько 20 %) з боку входу променя та отримати вузький зварний шов із практично паралельними бічними стінками.

Висновки

Встановлено, що при ЕПЗ плит алюмінієвого сплаву 2219 завтовшки 10 мм збільшення швидкості зварювання з 10 до 20 мм/с зменшує ширину ділянки знеміцнення приблизно вдвічі.

Використання технологічної накладки при зварюванні зі швидкістю 20 мм/с дозволяє додатково зменшити ширину зони знеміцнення приблизно на 20 % і отримати вузький зварний шов з практично паралельними бічними стінками. При цьому зниження шва, що утворюється, формується в тілі накладки; після її видалення зварений стик не вимагає подальшої механічної обробки.

Запропоновано алгоритм розрахунку співвідношення потужностей променя по вибраним ділянкам поверхні, що обробляється. Розрахунковим та експериментальним шляхами встановлено, що технологічна накладка відсікає периферійну частину електронного променя, що становить близько 5...7 % його повної потужності. На практиці вплив цієї периферійної частини призводить до небажаного розширення шва з боку входу променя та до додаткового нагрівання основного металу і, як наслідок, до збільшення розмірів зони знеміцнення.

Список літератури

1. Лозовская А.В., Чайка А.А., Бондарев А.А. и др. (2001) Разупрочнение высокопрочных алюминиевых сплавов при различных способах сварки плавлением. *Автоматическая сварка*, 3, 15–19. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/88714/03-Lozovskaya.pdf?sequence=1>
2. Fatih, Hayat (2022) Electron beam welding of 7075 aluminium alloy: Microstructure and fracture properties. *Engineering Science and Technology an International J.*, 34, 101093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2022.101093>
3. Meng, Qing-guo, Fang, Hong-yuan, Xu, Wen-li, Ji, Shu-de (2006) Microstructure and mechanical properties of 2219 Al-alloy heat-affected zone with twin wire welding. *Transactions of the China Welding Institution*, 3, 9–12. DOI: <https://hjxb.hwi.com.cn/hjxb/en/article/id/20060303>

4. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Под ред. Б.Е. Патона. Киев, Наук. думка.
5. Ghulam Hussain, Tauheed Shehbaz, Mohammed Alkahtani et al. (2024) Nanomechanical, mechanical and microstructural characterization of electron beam welded Al2219-T6 tempered aerospace grade alloy: A comprehensive study. *Heliyon*, 10(1), e23835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23835>
6. Скальський В.Р., Ботвина Л.Р., Лясота І.Н. (2012) Особенности структурной и механической неоднородности в сварных соединениях сплава 1201-т, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Автоматическая сварка*, 7, 19–23. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2012/pdfarticles/07/5.pdf>
7. Mastanaiah, P., Abhay, Sharma, Madhusudhan Reddy, G. (2018) Process parameters-weld bead geometry interactions and their influence on mechanical properties: A case of dissimilar aluminium alloy electron beam welds. *Defence Technology*, 14, 137–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.003>
8. Русиник М.О., Нестеренков В.М., Мiроslав Сахул, Клочков І.М. (2023) Вплив струму фокусування електронно-променевого зварювання на геометрію та мікроструктуру зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219. *Автоматичне зварювання*, 7, 31–36. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.07.04>
9. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. (1978) *Основы электронно-лучевой обработки материалов*. Москва, Машиностроение.
10. Скрядінський В.В. (1994) *Розробка технології електронно-променевого зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів 1570 і 1460 з регулюванням розподілу густини потужності променя*. дис. ... канд. техн. наук. АН України. Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона, Київ, 1994.
11. Скрядінський В.В., Нестеренков В.М., Русиник М.О. (2020) Електронно-променеє зварювання з програмуванням розподілу густини потужності променя. *Автоматичне зварювання*, 1, 51–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.01.07>
2. Fatih Hayat (2022) Electron beam welding of 7075 aluminium alloy: Microstructure and fracture properties. *Engineering Sci. and Technol. an Int. J.*, 34, 101093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101093>
3. Meng, Qing-guo, Fang, Hong-yuan, Xu, Wen-li, Ji, Shu-de (2006) Microstructure and mechanical properties of 2219 Al-alloy heat-affected zone with twin wire welding. *Transact. of the China Welding Institution*, 3, 9–12. DOI: <https://hjb.com.cn/hjxb/en/article/id/20060303>
4. Nazarenko, O.K., Kajdalov, A.A., Kovbasenko, S.N. et al. (1987) *Electron beam welding*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Naukova Dumka.
5. Ghulam Hussain, Tauheed Shehbaz, Mohammed Alkahtani, Usman Abdul Khaliq, Hongyu Wei (2024) Nanomechanical, mechanical and microstructural characterization of electron beam welded Al2219-T6 tempered aerospace grade alloy: A comprehensive study. *Heliyon*, 10(1), e23835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23835>
6. Skalsky, V.R., Botvina, L.R., Lyasota, I.N. (2012) Peculiarities of structure and mechanical heterogeneity in EB-welded joints of 1201-T alloy. *The Paton Welding J.*, 7, 15–18. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2012/pdfarticles/07/5.pdf>
7. Mastanaiah P., Abhay Sharma, Madhusudhan Reddy G. (2018) Process parameters-weld bead geometry interactions and their influence on mechanical properties: A case of dissimilar aluminium alloy electron beam welds. *Defence Technology*, 14, 137–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.003>
8. Rusynyk, M.O., Nesterenkov, V.M., Sahul, M., Klochkov, I.M. (2023) Influence of electron beam focusing current on geometry and microstructure of welded joints of aluminium 2219 alloy. *The Paton Welding J.*, 7, 31–36. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.07.04>
9. Rykalin, N.N., Zuyev, I.V., Uglov, A.A. (1978) Basis of electron-beam material processing. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
10. Skryabinskyi, V.V. (1994) *Development of technology of electron beam welding of high-strength aluminium alloys 1570 and 1460 with control of density distribution of beam power*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
11. Skryabinskyi, V.V., Nesterenkov V.M., Rusynyk, M.O. (2020) Electron beam welding with programming of beam power density distribution. *The Paton Welding J.*, 1, 49–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.01.07>

References

1. Lozovskaya A.V., Chajka A.A., Bondarev A.A., Poklyatsky A.G., Bondarev Andr.A. (2001) Softening of high-strength aluminium alloys in different fusion welding processes. *The Paton Welding J.*, 3, 13–17. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2001/tpwj200103all.pdf>

INFLUENCE OF ELECTRON BEAM WELDING TECHNOLOGY ON THE WIDTH OF THE SOFTENING ZONE OF 2219 ALUMINUM ALLOY

V.V. Skryabinskyi, V.M. Nesterenkov, M.O. Rusynyk, V.I. Zagornikov, O.I. Goncharenko, I.M. Klochkov

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

E-mail: skriabinski.vv.555@gmail.com

During electron beam welding (EBW) of 2219 alloy, the strength characteristics of joints can decrease by up to 50 % in relation to the base metal. In order to ensure the uniform strength of the structure, locations of the welds are chosen in thickened areas. At the same time, the width of the thickened area should be larger than the width of the softening zone of the welded joint. The softening zone of the joint includes the cast zone and the heat-affected zone (HAZ), in which the strength of the base metal decreased. The influence of welding speed and the use of technological overlay on the width of the cast zone and the HAZ, i.e. on the width of the softening zone during EBW of 2219 alloy plates, were investigated. It was found that an increase in the welding speed from 10 to 20 mm/s reduces the width of the softening zone by approximately half. The use of a technological overlay allows reducing the width of the softening zone by approximately 20 %. In this case, the weld depression is formed in the body of the overlay, and after its removal, the welded butt does not require further mechanical treatment. The calculation and experimental methods established that the technological overlay cuts off the peripheral part of the electron beam, which is about 5 % of its full power. In practice, the influence of this peripheral part leads to undesirable expansion of the weld on the side of the beam entrance and to additional heating of the base metal and, as a result, to an increase in the size of the softening zone. 11 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

Keywords: electron beam welding, aluminium alloy, heat-affected zone, softening zone, technological strap

Отримано 04.03.2025

Отримано у переглянутому вигляді 06.05.2025

Прийнято 15.05.2025