

## ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ЗВАРЮВАННЯ З ПРОГРАМУВАННЯМ РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ ПОТУЖНОСТІ ПРОМЕНЯ

В.В. Скрябінський, В.М. Нестеренков, М.О. Русиник

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

В існуючих моделях процесу електронно-променевого зварювання форма і розміри зони проплавлення визначаються як енергетичними параметрами, так і формою джерела нагріву. Ефективно управляти розподілом густини потужності електронного променя, а, отже, формою джерела нагріву можливо за допомогою використання дискретних розгортток. Розроблено методику та комп'ютерну програму для розрахунку розподілу густини потужності при дискретному скануванні електронного променя з урахуванням координат точок розгортки, відносного часу його зупинки в точках і частоти розгортки. Спільне використання комп'ютерної програми для розрахунку розподілу густини потужності променя і математичної моделі електронно-променевого зварювання дозволяє отримувати задану форму і розміри зони проплавлення. Наведено результати розрахунку режимів зварювання та поперечні шліфи швів з паралельними боковими стінками і великим радіусом закруглення кореня при неповному проплавленні зразків з нержавіючої сталі. Також наведено методику розрахунку параметрів режиму електронно-променевого зварювання та поперечний шліф з'єднання різнойменних сплавів. Бібліогр. 11, рис. 7.

*Ключові слова:* електронно-променево зварювання, густина потужності променя, комп'ютерне проектування розгортток, форма зони проплавлення, зварювання різнойменних сплавів

При електронно-променевому зварюванні (ЕПЗ) основними параметрами режиму є прискорювальна напруга, струм променя, швидкість зварювання та положення фокальної плями променя відносно поверхні виробу, що зварюється. У разі використання осциляції променя до них додаються траєкторія, амплітуда і частота розгортки. Одночасний облік цих параметрів ЕПЗ для отримання високої якості з'єднань є складним, але актуальним завданням.

Метою даної роботи є демонстрація можливості управління формою парогозового каналу і, відповідно, формою зони проплавлення за допомогою комп'ютерного проектування розгортток променя зі спільним використанням математичної моделі ЕПЗ.

Інтенсивність впливу електронного променя в будь-якій точці оброблюваної поверхні пропорційна його густині потужності. Багато дослідників основним ефектом від розгортки називають можливість змінювати розподіл густини потужності електронного променя (тут і далі мова йде не про миттєву, а про усереднену за період розгортки густину потужності променя). При цьому змінюється форма парогозового каналу, його стійкість до зовнішніх збурень, форма зони проплавлення і, відповідно, ймовірність утворення кореневих дефектів [1–4].

Ефективно управляти розподілом густини потужності електронного променя а, отже, формою джерела нагріву при ЕПЗ можливо за допомогою

цифрових систем розгортки [5, 6]. У таких системах електронний промінь переміщується дискретно по заданій матриці точок, що складають траєкторію розгортки. Координати точок траєкторії та відносний час зупинки променя в цих точках за один період розгортки записують в постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП). Система управління перетворює цифровий код розгортки в електричні сигнали і подає їх на котушки відхилення електронно-променевої гармати.

Оцінка розподілу густини потужності електронного променя є досить складною задачею навіть при використанні найпростіших траєкторій розгортки (коло, півколо та ін.). Для цього крім траєкторії необхідно враховувати ступінь фокусування променя та амплітуди розгортки по осях  $X$  та  $Y$ . При використанні дискретних розгортток в розрахункову формулу також входять координати точок зупинки променя та відносний час його зупинки. У зв'язку з тим, що перехід променя з однієї точки в іншу здійснюється з кінцевою швидкістю (що визначається загальною інерційністю системи відхилення), розподіл густини потужності променя буде визначатися, в тому числі і частотою розгортки [7].

Беручи розподіл потужності в статичному промені близьким до Гаусового, відносну густину потужності скануючого електронного променя в  $i$ -й точці  $q(x_i, y_i)$  можна визначити як суму впливу  $N$  нормальних точкових і  $N$  лінійних джерел:

В.В. Скрябінський – <http://orcid.org/0000-0003-4470-3421>; В.М. Нестеренков – <http://orcid.org/0000-0002-7973-1986>;  
М.О. Русиник – <http://orcid.org/0000-0002-7591-7169>

© В.В. Скрябінський, В.М. Нестеренков, М.О. Русиник, 2020

$$q(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N \exp(-\frac{r_{ij}^2}{2r_e^2})t_j + A(f) \sum_{j=1}^N \exp(-\frac{r_{ik}^2}{2r_e^2})t_{j(j-1)}, \quad (1)$$

де  $A(f)$  – співвідношення між інтенсивністю точкових і лінійних джерел, залежне від частоти розгортки ( $f$ );  $N$  – кількість точок розгортки;  $r_e$  – ефективний радіус променя;  $r_{ij}$  – відстань від розрахункової точки  $i$  до  $j$ -ої точки розгортки;  $r_{ik}$  – відстань від розрахункової точки  $i$  до лінійного джерела;  $t_j$  – відносний час перебування променя в  $j$ -й точці розгортки;  $t_{j(j-1)}$  – час переходу променя з точки  $j-1$  в точку  $j$ .

Схема для розрахунку представлена на рис. 1. Функцію  $A(f)$  розраховують чисельними методами, з огляду на загальну інерційність системи відхилення променя. У нашому випадку інерційність системи залежить від параметрів котушок відхилення, генератора розгортки і підсилювачів струму, що відхиляє.

Комп'ютерні програми для проектування розгортки і оперативного контролю розподілу густини потужності променя при ЕПЗ дозволяють з високою точністю проводити розрахунки і виводити на екран та/або записувати в ПЗП отримані результати [7, 8]. При проектуванні розгортки користувач задає координати  $N$  дискретних положень променя, а також час його перебування в кожному з обраних положень (рис. 2).

Водночас на екрані комп'ютера зображується форма джерела нагріву (горизонтальна проекція і об'ємне зображення). Існує можливість вільно перетягувати точки розгортки по екрану або завантажувати з ПЗУ і редагувати вже існуючі траєкторії. Важливо відзначити, що в процесі проектування користувач не тільки розставляє точки траєкторії розгортки і задає відносний час зупинки променя, але і може перевірити вплив зміни фокусування,

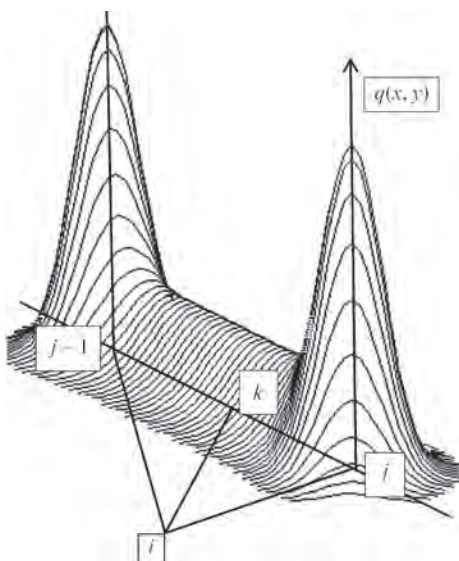


Рис. 1. Схема для розрахунку розподілу густини потужності електронного променя, що враховує частоту розгортки

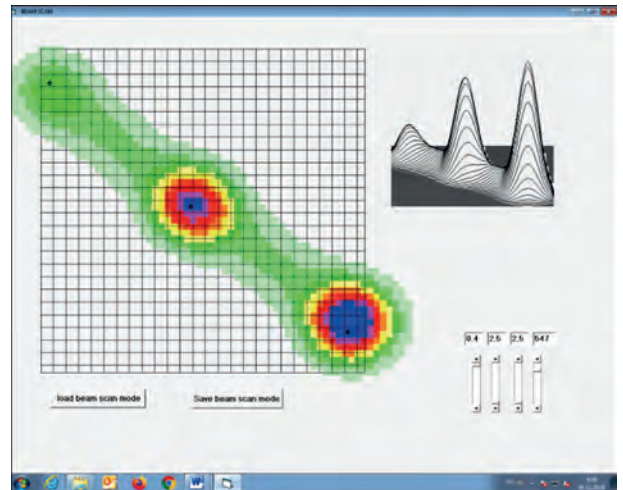


Рис. 2. Форма джерела нагріву (горизонтальна проекція та об'ємне зображення) при проектуванні розгортки на екрані комп'ютера. Параметри розгортки: кількість точок – 3; відносний час зупинки променя в точках 1, 2, 3; частота – 550 Гц

амплітуди і частоти розгортки на результуючий розподіл потужності променя. Кожен з цих параметрів проявляє свій специфічний вплив на результат розрахунку за формулою (1) і, отже, на процес ЕПЗ. Для з'ясування цього впливу за допомогою комп'ютерної програми було проведено розрахунки наведених розподілів потужності променя при почерговій зміні амплітуди розгортки ( $D$ ), ступеня фокусування (ефективного радіуса променя  $r_e$ ) і часу зупинки променя ( $T$ ) в точках сканування (рис. 3).

Розрахунки проводили для кругової траєкторії сканування. Збільшення амплітуди розгортки призводить до пропорційного збільшення ширини зони впливу променя при різкому зниженні його інтенсивності та утворення западини в центральній частині графіка. Розфокусування променя (збільшення  $r_e$ ) також збільшує ширину зони впливу, нівелюючи центральну западину на графіку. Зміна часу зупинки променя в точках траєкторії розгортки дозволяє в широких межах регулювати розподіл густини потужності, практично не впливаючи на його ширину. Так, тепловкладення в центральній частині шва можна змінити в два рази змістивши точки з подвоєним часом зупинки променя від центральної до бокових частин зварювальної ванни як показано на рис. 4.

Де і як можна використовувати комп'ютерне управління розподілом густини потужності електронного променя? Інформація про форму джерела нагріву може знадобитися для проведення подальших розрахунків, пов'язаних з математичним моделюванням процесу ЕПЗ. Наприклад, управління формою і розмірами зони проплавлення завжди становило актуальну задачу з точки зору як теорії, так і практики ЕПЗ. Ряд існуючих моделей процесу ЕПЗ дозволяють не тільки оцінити глибину і ширину зварного шва, а й розраховують

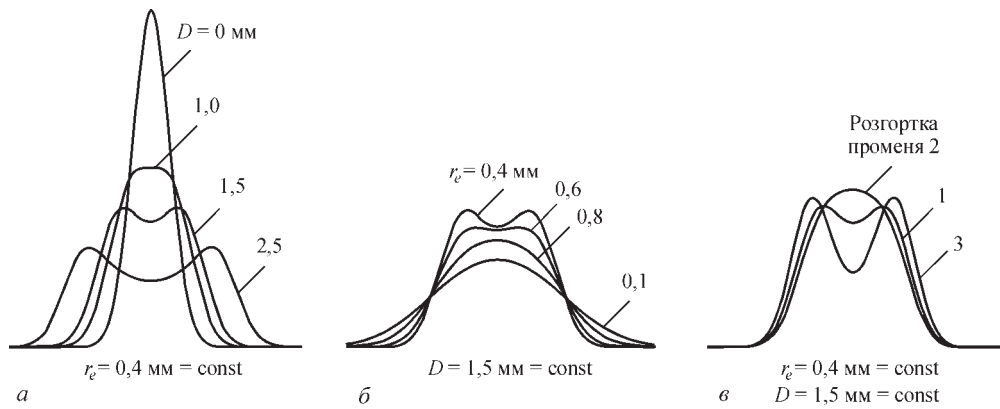


Рис. 3. Розподіл густини потужності електронного променя для кругової розгортки при зміні: амплітуди кругової розгортки (а); фокусування променя (б); відносного часу зупинки променя в точках траєкторії розгортки (в). Розгортки променя для розрахунку кривих на рис. 3, в показані на рис. 4

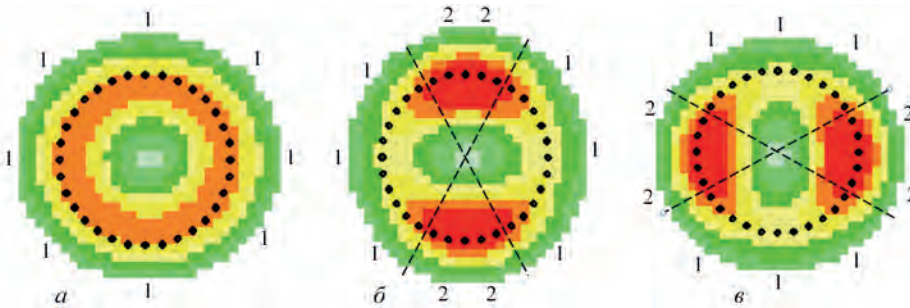


Рис. 4. Кругові розгортки електронного променя (32 точки) з різним відносним часом зупинки променя в точках траєкторії. Цифри на малюнку показують відносний час зупинки променя в точках: а – розгортка променя 1; б – 2; в – 3

форму зони проплавлення. У них при проведенні розрахунків не передбачається можливість регулювання розподілу енергії в джерелі нагріву, а основні висновки, як правило, стосуються ступеня відповідності розрахункових і експериментальних даних [9–11].

Програмування розподілу густини потужності променя дозволяє в широких межах змінювати форму джерела нагріву і, отже, є зручним інструментом для управління формою зони проплавлення. Практичний інтерес представляло ввести в математичну модель змінну величину (в нашому випадку розподіл густини потужності променя), змінюючи яку, можна регулювати форму зони проплавлення.

У даній роботі для передбачення форми зони проплавлення вибрали математичну модель, наведену в роботі [3]. У ній на підставі закону збереження енергії для елемента поверхні каналу проплавлення виводиться рівняння, що описує форму передньої стінки каналу в циліндричній системі координат для будь-якого розподілу густини потужності електронного променя:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\rho V_{\text{св}} G_{\text{тм}} \cos \varphi - q_{\text{т}}}{\eta_{\text{н}} q(r, \varphi)}, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питома вага металу;  $V_{\text{св}}$  – швидкість зварювання;  $G_{\text{тм}}$  – зміст тепла в одиниці маси металу;  $q_{\text{т}}$  – густина потужності тепловідведення;  $\eta_{\text{н}}$  – ефективний ККД процесу;  $q(r, \varphi)$  – розподіл густини потужності променя.

Практичну перевірку способу управління формою зони проплавлення провели наступним чином. Комп'ютерну програму для розрахунку розподілу густини потужності електронного променя по формулі (1) доповнили рівнянням каналу проплавлення (2) і вивели зображення передньої стінки каналу на екран. Провели розрахунок форми зони проплавлення для ЕПЗ нержавіючої сталі з неповним проплавленням на режимі: прискорювальна напруга 60 В; струм променя 170 А; швидкість зварювання 10 м/с; дискретна кругова розгортка променя (кількість точок  $N = 32$ ) з амплітудою 1,5 мм, частотою 500 Гц і рівномірним тепловкладенням по траєкторії. З огляду на відносно невисоку теплопровідність матеріалу, було вирішено знехтувати втратами на тепловідведення від передньої стінки каналу проплавлення. Траєкторії розгортки, розподіл густини потужності променя, розрахункові та експериментальні форми зони проплавлення показано на рис. 5, 6.

На згаданому вище режимі провели зварювання дослідного зразка з нержавіючої сталі та виготовили макрошліф 1 (рис. 6, б). Розрахункові та експериментальні геометричні характеристики зони проплавлення відрізнялися незначно. Ширина шва становила близько 2,0 мм при глибині проплавлення 24 мм. Корінь шва був гострим. Відомо, що при такій формі зони проплавлення формування швів часто супроводжується утворенням кореневих дефектів у вигляді незаповнених металом порожнин.

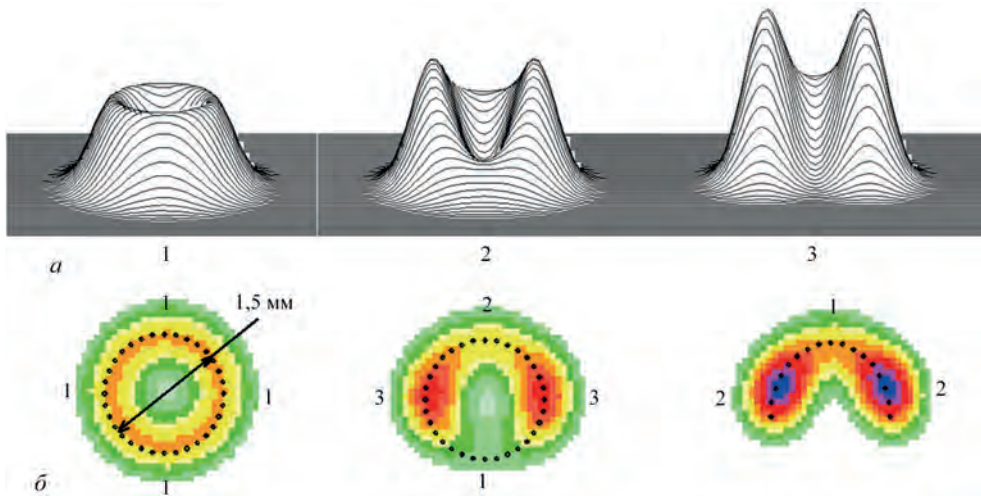


Рис. 5. Розподіл густини потужності електронного променя (а) і траєкторії розгортки (б) при ЕПЗ нержавіючої сталі (опис 1–3 див. у тексті)

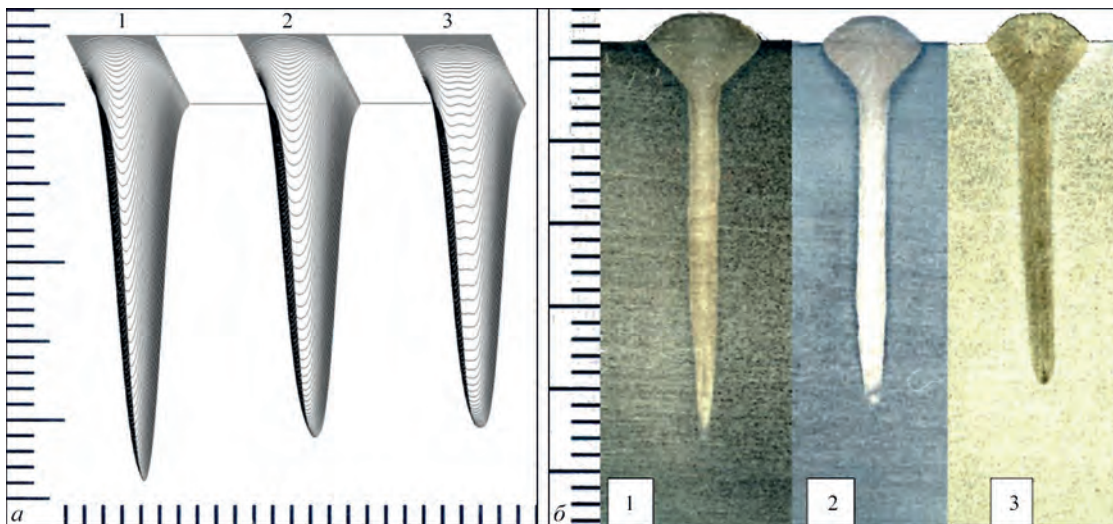


Рис. 6. Розрахункова форма передньої стінки каналу проплавлення (а) і поперечні шліфи (б) при ЕПЗ нержавіючої сталі (опис 1–3 див. у тексті)

Розподіл енергії в плямі нагріву змінили, збільшивши відносний час зупинки променя в точках кругової траєкторії розгортки, у бокових частин зварювальної ванни. Кількість точок, їх координати та інші параметри режиму ЕПЗ залишалися незмінними. При кожній зміні часу зупинки (як і будь-якого іншого параметра) комп'ютерна програма відображала відповідні зміни розподілу густини потужності променя і форми зони проплавлення. Після певного зміщення нагріву від осі шва до бокових частин зварювальної ванни ми збільшили радіус закруглення кореня шва орієнтовно в два рази. Глибина проплавлення при цьому зменшилася з 24 до 22 мм (див. рис. 6, а – 2). Параметри розгортки променя зберігали в ПЗП.

Аналогічно, за допомогою комп'ютерної програми, проектували траєкторію розгортки електронного променя у вигляді півкола. Тобто спочатку на рівній відстані один від одного розставили на екрані точки зупинки променя по обраній траєкторії сканування (в нашому випадку по дузі кола зі зворотно-поступальним рухом променя). Далі вве-

ли в програму параметри режиму ЕПЗ, характеристики зварюваного матеріалу і отримали на екрані комп'ютера зображення форми зони проплавлення. Так само як і в попередньому випадку, поступово збільшуючи відносний час зупинки променя в бокових частинах траєкторії розгортки, домагалися максимального збільшення радіусу заокруглення в корені шва (див. рис. 6, а, – 3). Режим ЕПЗ, включаючи спроектовані розгортки променя, застосували при ЕПЗ вакуумних камер з нержавіючої сталі. Ультразвуковий контроль зварних з'єднань показав відсутність несплавлення та кореневих дефектів по всій протяжності швів.

Комп'ютерне проектування розгорток електронного променя може бути корисним при ЕПЗ різних металів. Звичайним прийомом при зварюванні різнорідних металів і сплавів є зміщення аксіально симетричної плями нагріву в сторону більш тугоплавкого металу. Величину цього зміщення або розраховують, або визначають експериментально. Таким чином, зменшують ймовірність утворення несплавлення в кореневій частині шва.

При ЕПЗ з програмуванням густини потужності променя необхідно збільшувати вкладення тепла в тугоплавкий метал, регулюючи параметри розгортки. Теплофізичні розрахунки ґрунтуються на тому, що співвідношення потужностей променя, що припадає на кромки, повинно бути пропорційно співвідношенню кількості тепла, необхідного для розплавлення одиниці об'єму кожного металу. Частину потужності електронного променя, що йде на нагрів металу 1, можна розрахувати за формулою:

$$Q_{Me1} = 0,24\eta_{и} I_{л} U_{yc} \iint_{Me1} q(x, y) dx dy, \quad (3)$$

де  $\eta_{и}$  – ефективний ККД процесу;  $I_{л}$  – струм променя;  $U_{yc}$  – прискорювальна напруга;  $Me1$  – область впливу променя, яка припадає на метал 1;  $q(x, y)$  – розподіл щільності потужності променя.

Аналогічно розраховується потужність променя і для металу 2. Таким чином, регулюючи розподіл густини потужності між різними областями впливу променя, ми можемо створити умови для формування симетричної форми зони проплавлення.

Реалізацію способу ЕПЗ різномірних сплавів з регулюванням тепловкладення провели при зварюванні зразків алюмінієвих сплавів 1201 (система легування Al–Cu) і 1460 (система легування Al–Cu–Li) товщиною 18 мм. Теплофізичний розрахунок показав, що для одночасного розплавлення рівних обсягів металу цих сплавів необхідно близько 55 % потужності електронного променя направляти на кромку сплаву 1201 і близько 45 % потужності на сплав 1460. Зварювання проводили з круговою розгорткою променя амплітудою 2,5 мм. Вибір параметрів розгортки променя для забезпечення необхідного зсуву потужності променя в бік сплаву 1201 проводили за допомогою комп'ютерної програми. Обчислення за формулою (3) не завдавали труднощів тому інформація щодо густини потужності електронного променя  $q(x, y)$  в програмі записується у вигляді двомірного масиву, який не складно проінтегрувати (підсумувати) по будь-якій області.

Для зварювання використовували прискорювальну напругу 30 кВ та струм променя 350 мА на

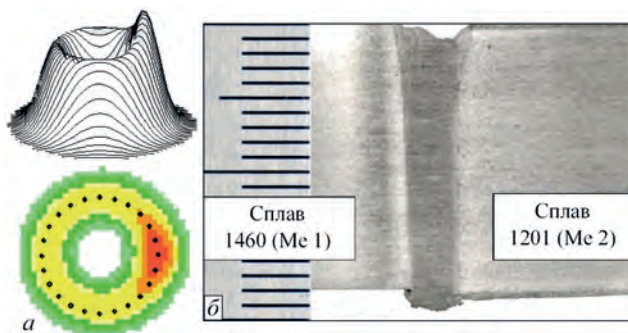


Рис. 7. Траєкторія розгортки з розподілом густини потужності електронного променя (а) і поперечний переріз шва (б) при ЕПЗ сплавів 1460 і 1201

швидкості 11 мм/с. Розподіл густини потужності променя та поперечний переріз зони проплавлення показано на рис. 7.

Зварний шов має практично паралельні бокові стінки, а рентгеноспектральний аналіз різних ділянок зварного з'єднання показав, що вміст легуючих елементів в металі шва коливається навколо середнього арифметичного від їх вмісту в сплавах, що зварюються. Це свідчить про те, що при оплавленні обидві кромки стику в рівній мірі брали участь у формуванні зварного шва.

## Висновки

1. Комп'ютерне проектування розгортки променя зі спільним використанням математичної моделі ЕПЗ дає можливість управляти формою пароголового каналу, а, отже, формою зони проплавлення.

2. Керуючи розподілом густини потужності променя, можна зварювати різномірні метали і сплави з формуванням симетричної зони проплавлення.

## Список літератури

1. Рыжков Ф.Н., Суворин В.Я. (1971) Технологические особенности сварки в вакууме колеблющимся поперек шва электронным пучком. *Автоматическая сварка*, **1**, 16–21.
2. Нестеренков В.М., Кравчук Л.А. (1981) Выбор параметров вращения пучка по окружности и их влияние на геометрию шва при электронно-лучевой сварке. *Там же*, **10**, 25–28.
3. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.М. и др. (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Наукова думка.
4. Варушкин С.В., Беленький В.Я., Зырянов Н.А., Кылосов А.А. (2017) Осцилляция электронного луча как средство улучшения формирования корня сварного шва и облегчения контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке. *Машиностроение, материаловедение*, **19**, **2**, 151–59.
5. Ланкин Ю.Н., Бондарев А.А., Байштрук Е.Н., Скрыбинский В.В. (1985) Управление распределением плотности мощности электронного пучка по его сечению. *Автоматическая сварка*, **6**, 12–15.
6. Ланкин Ю.Н., Бондарев А.А., Довгодько Е.И., Дьяченко В.А. (2009) Система управления разверткой для электронно-лучевой сварки. *Там же*, **9**, 16–20.
7. Скрыбинский В.В. (1994) *Разработка технологии электронно-променевого зварювання високомірних алюмінієвих сплавів 1570 і 1460 з регулюванням розподілу густини потужності променя*. дис. ... канд. техн. наук. АН України. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Київ, 1994.
8. Ланкин Ю.Н., Соловьев В.Г., Семикин В.Ф. и др. (2017) Компьютерная система графического проектирования разверток и моделирование результирующего распределения плотности тока электронного луча. *Лучевые технологии в сварке и обработке материалов. Восьмая международная конференция. Сборник трудов, 11–15 сентября 2017 г., Одесса, Украина*, сс. 59–60.
9. Zhang Hong, Men Zhengxing, Li Jiukai et al. (2018) Numerical Simulation of the Electron Beam Welding and Post Welding Heat Treatment Coupling Process. *High Temp. Mater. Proc.*, **37**(9-10), 793–800.
10. Cerveraa M., Dialamia N., Wub B. et al. (2016) Numerical modeling of the electron beam welding and its experimental validation. *Finite Elements in Analysis and Design*, **11**, 121, 118–133.
11. Ластовиця В.Н. (2008) Принципы управления формой проплава в технологическом процессе электронно-лучевой сварки. *Машиностроение и инженерное образование*, **3**, 12–17.

References

1. Ryzhkov, F.N., Suvorin, V.Ya. (1971) Technological features of vacuum welding by electron beam oscillating across weld. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 16-21 [in Russian].
2. Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A. (1981) Selection of parameters of beam rotation around the circumference and their influence on weld geometry in electron beam welding. *Ibid.*, **10**, 25-28 [in Russian].
3. Nazarenko, O.K., Kaydalov, A.A., Kovbasenko, S.M. (1987) *Electron beam welding*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Varushkin, S.V., Belenky, V.Ya., Zyryanov, N.A., Kylosov, A.A. (2017) Oscillation of electron beam as a means of improvement of weld root formation and facilitation of through penetration in electron beam welding. *Mashinostroenie, Materialovedenie*, **19(2)**, 151-159 [in Russian].
5. Lankin, Yu.N., Bondarev, A.A., Bajshtruk, E.N., Skryabinsky, V.V. (1985) Control of density distribution of electron beam power on its section. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 12-15 [in Russian].
6. Lankin, Yu.N., Bondarev, A.A., Dovgodko, E.I., Diachenko, V.A. (2009) Control system for beam scanning in electron beam welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 13-16.
7. 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*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
8. Lankin, Yu.N., Soloviov, V.G., Semikhin, V.F. et al. (2017) Computer system of graphic design of scanning and modeling of final distribution of electron beam current density. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing (11-15 September, 2017, Odessa, Ukraine)*, 59-60.
9. Zhang Hong, Men Zhengxing, Li Jiukai et al. (2018) Numerical simulation of the electron beam welding and post welding heat treatment coupling process. *High Temp. Mater. Proc.*, **37(9-10)**, 793-800.
10. Cerveraa, M., Dialamia, N., Wub, B. et al. (2016) Numerical modeling of the electron beam welding and its experimental validation. *Finite Elements in Analysis and Design*, **11(121)**, 118-133.
11. Lastoviryia, V.N. (2008) Principles of control of penetration shape in technological process of electron beam welding. *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, **3**, 12-17 [in Russian].

ELECTRON BEAM WELDING WITH PROGRAMMING OF BEAM POWER DENSITY DISTRIBUTION

V.V. Skryabinsky, V.M. Nesterenkov, M.O. Rusynyk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

In the existing models of electron beam welding process, the shape and sizes of penetration zone are determined both by power parameters as well as shape of heating source. The effective control of the electron beam power density distribution and, therefore, of the shape of the heating source is possible by using a discrete scanning. A procedure and a computer program were developed to calculate the power density distribution at a discrete scanning of electron beam, taking into account the coordinates of scan points, relative time of its stop at the points and frequency of scanning. The joint application of a computer program for calculation of the power density distribution together with a mathematical model of electron beam welding allows obtaining a set shape and sizes of penetration zone. The results of calculation of welding modes and cross-sections of welds with parallel side walls and a large radius of rounding of the root during a partial penetration of specimens of stainless steel are given. The method of calculating the electron beam welding parameters and cross-section of the joint of dissimilar alloys are also given. 11 Ref., 7 Fig.

*Keywords:* electron beam welding, beam power density, computer-aided design of scanning, shape of penetration zone, welding of dissimilar alloys

Надійшла до редакції 07.11.2018

**iiw**  
ASSOCIATED EVENT

**YOUNG PROFESSIONALS  
INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES**

**YPIC and WRTYS 2020**

**19-22 MAY 2020**      **Kyiv, UKRAINE**      **ypic2020.com**