

ПРОГРАМУВАННЯ РОЗГОРТКИ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ З ТЕРМООБРОБКОЮ

В.Г. Соловійов, Ю.М. Ланкін, І.Ю. Романова

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

Розгортка електронного пучка для електронно-променевого зварювання і термообробки повинна забезпечувати температурно-часові параметри структурно-фазових перетворень у зоні обробки металу: ступінь нагрівання, характер розподілу теплоти, швидкість нагріву й охолодження. Регулювання термічних циклів можливе за допомогою управління тепловою потужністю електронного пучка, його фокусуванням і просторово-часовим положенням. Розроблено багатоцільову комп'ютерну програму проектування розгорток, яка дозволяє реалізувати розгортки з довільним (заданим технологом) результуючим розподілом щільності потужності електронного пучка по точках його зупинок в зоні дії на метал для зварювання та термообробки виробу. У результаті розраховуються синхронізовані з розгорткою зміни струмів відхиляючих котушок і фокусної лінзи. Бібліогр. 10, рис. 8.

Ключові слова: електронно-променеві технології, щільність потужності пучка, розгортка електронного пучка, термообробка, графічне комп'ютерне проектування розгортки.

Теплові електронно-променеві технології (ЕПТ) стають усе більш вживаними, особливо тому, що вони екологічно чисті та енергозберігаючі з одного боку і високоточні, відмінно контрольовані та високопродуктивні з іншого боку. Використовуючи тривимірні поля перенесення енергії, можна враховувати умови взаємодії між електронним пучком і поверхнею металу, особливості його теплопровідності, геометрію деталі та умови теплових збурень в зварювальній ванні.

Використання осциляції (періодичні коливання) променя за допомогою спеціальних аналогових генераторів струму різної форми почали вивчати на початку 1970-х років [1]. Висока продуктивність досягається завдяки новим технологічним рішенням, таким, як одночасна взаємодія електронного пучка в декількох зонах обробки (точках) або одночасне проведення декількох процесів. Розвиток техніки двомірного високочастотного відхилення променя став початком нової області теплових електронно-променевих технологій. З появою техніки високошвидкісної цифрової осциляції (розгортка електронного пучка) [2] стало можливим легко реалізувати розгортку з практично будь-якою траєкторією руху пучка на площині. У 2000 р. був створений високочастотний метод відхилення променя з новими можливостями для ЕПТ і теплових збурень, специфічних для конкретної моделі [3]. З'явилася можливість «розщеплювати» і фокусувати пучок відповідно до конфігурації виробу.

Розвиток нових систем управління електронним пучком і програмування режимів зварювання значно розширило можливості вдосконалення

технологічних прийомів для ЕПТ. Це забезпечило майже необмежену різноманітність режимів дії променя на поверхню оброблюваної деталі (зварювання з цифровою осциляцією, багатопробене і багатофокусне зварювання, комбіновані способи зварювання та різні види теплової обробки металів) [4, 5].

Методики проектування розгорток для отримання заданої форми зони проплавлення сплавів при електронно-променевому зварюванні (ЕПЗ) та для ЕПЗ різноманітних сплавів вже розроблені та опубліковані у роботах [6-8]. А ось методика прогнозування нагрівання зони впливу електронного пучка на метал при термообробці зараз не розроблена.

Мета роботи – прогнозування нагріву зони впливу електронного пучка на метал при термообробці шляхом моделювання його розгортки.

Розрахунок електронно-променевого джерела тепла для зварювання. При зварюванні деяких сплавів для покращення структури та властивостей зварних з'єднань потрібні термічні цикли, що відрізняються від створюваних звичайними зварювальними джерелами тепла. Висока керованість електронного пучка дозволяє забезпечити за його допомогою регулювання термічних циклів. Завдяки цьому з'являється можливість використовувати один і той же електронний пучок для одночасного зварювання та термообробки шляхом періодичного електромагнітного відхилення вздовж шва. Якщо частота відхилень досить велика, то термічний вплив такого пучка еквівалентний впливу смугового джерела зі складною зміною питомої потужності вздовж шва. Еквівалентний розподіл питомої потужності, а, отже, і температурне поле, що формується, визнача-

ються законом переміщення електронного пучка по поверхні виробу.

Встановлення експериментальним шляхом розподілу питомої потужності джерела тепла вздовж шва, яке необхідне для визначення заданого розподілу температури, є досить складним завданням. Тому є цікавою відповідна попередня розрахункова оцінка. Отримані дані можуть бути вихідними при подальшому їх експериментальному уточненні. Це скорочує кількість трудомістких та коштовних експериментів.

При термообробці розплавлення металу не відбувається. Отже, електронний пучок є поверхневим джерелом тепла. Тому регулювання термічного циклу зварного шва є найефективнішим при ЕПЗ тонких пластин, у яких температура по товщині листа змінюється незначно.

Квазівстановлена температура в пластині по осі шва від дії нормально-кругового джерела тепла, що рухається, в рухомій системі координат описується рівнянням [9]:

$$T(x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \exp(-X) \int_{\tau_0}^{\infty} \frac{\exp(-\frac{X^2}{4\tau} - \tau)}{\tau} d\tau, \quad (1)$$

де $T(x)$ – температура по осі шва (К); $X = \frac{xy_{зв}}{2a}$; x – координата вздовж зварного шва (мм); $v_{зв}$ – швидкість зварювання (мм/с); a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу (мм²/с); q – ефективна теплова потужність електронного пучка (Вт/мм²·с); λ – коефіцієнт теплопровідності ма-

теріалу (Вт/мм·К); δ – товщина пластини (мм); r_c – радіус електронного пучка (мм); $\tau_0 = \frac{v_{зв}^2 r_c^2}{8a^2}$; t – час (с); $\tau = \frac{v_{зв}^2 t}{4a}$.

На рис. 1–4 наведено розподіл температури вздовж осі зварного шва, розрахований за формулою (1), де $D_{\text{ФП}}$ – фокальний діаметр пучка (мм), $T_{\text{ТО}}$ – задана температура термообробки шва (К). Для отримання таких температурних полів необхідно мати розподілене вздовж осі x смугове джерело тепла q_n зі змінною вздовж x питомою потужністю $q_{2n}(x)$.

Задача визначення $q_{2n}(x)$ найпростіше вирішується чисельно, для чого безперервне нормально-смугове джерело q_n замінюється еквівалентною йому за тепловим впливом композицією нормально-кругових джерел, розташованих один від одного на відстані L (мм). Розглянемо, як залежить нерівномірність результуючої питомої потужності композиції нормально-кругових джерел нагрівання від кроку L . Результуюча питома потужність у кожній точці по осі шва, обумовлена композицією однакових нормально-кругових джерел тепла, визначається за формулою:

$$q_{2n}(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} q_{2m} \exp\left(-\frac{(Lj-x)^2}{2r_c^2}\right),$$

де q_{2m} – максимальна питома потужність нормально-кругового джерела тепла (Вт/мм²·с).

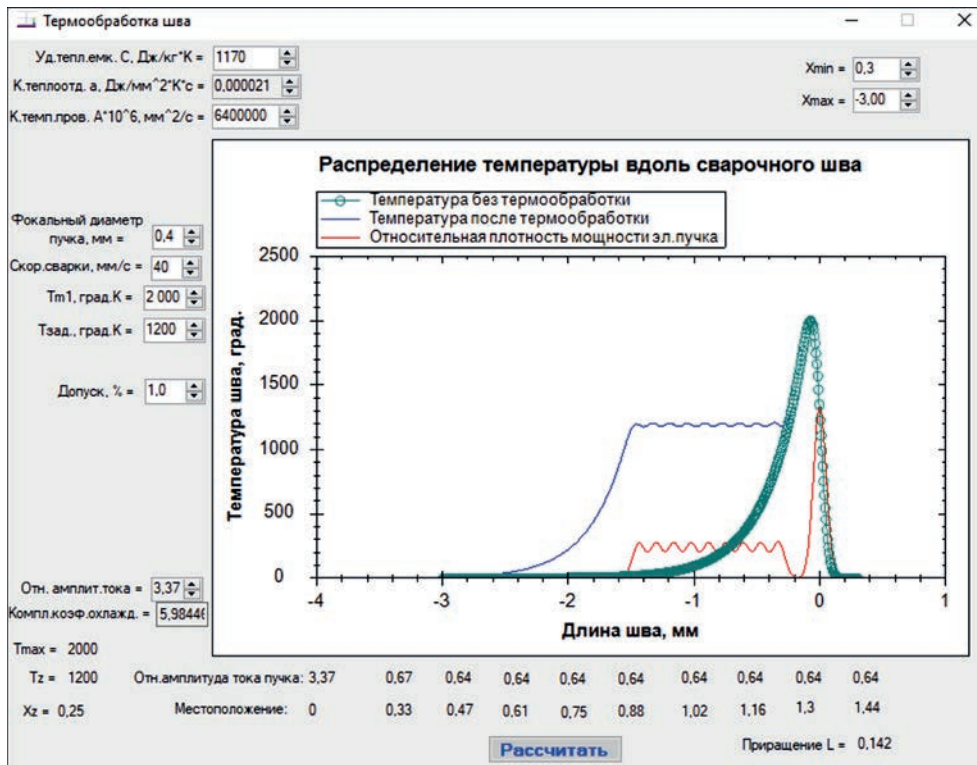


Рис. 1. Квазівстановлений розподіл температури в зварювальному шві з термообробкою шва: $T_{\text{ТО}} = 1200$ К; $D_{\text{ФП}} = 0,4$ мм; $V_{\text{зв}} = 40$ мм/с

Завдяки тепловій інерції металу, що зварюється, пульсації температури будуть завжди менші за просторову нерівномірність джерела тепла $q_m(x)$.

Розподіл температури вздовж осі зварного шва, що створюється композицією нормально-кругових джерел тепла, можна подати у вигляді:

$$T_n(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} T_j(x)q_j,$$

де q_j – потужність нормально-кругового джерела тепла з центром в точці з координатою $x_j=Lj$; $T_j(x)$

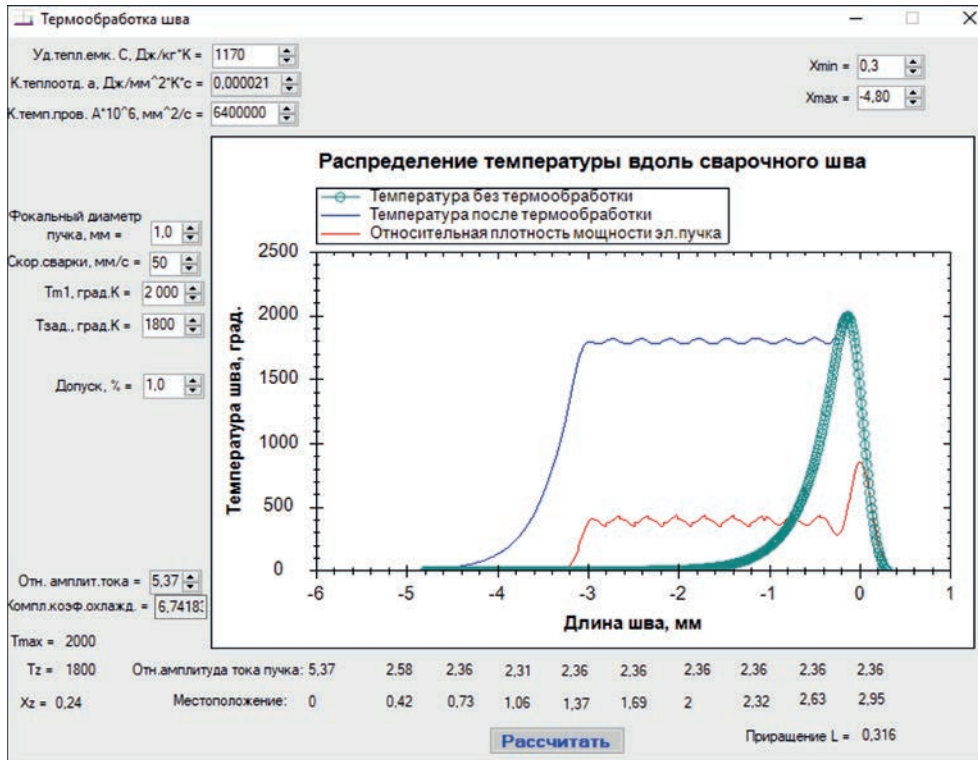


Рис. 2. Квазівстановлений розподіл температури в зварювальному шві з термообробкою шва: $T_{TO} = 1800$ К; $D_{\text{ФП}} = 1$ мм; $V_{\text{зв}} = 50$ мм/с

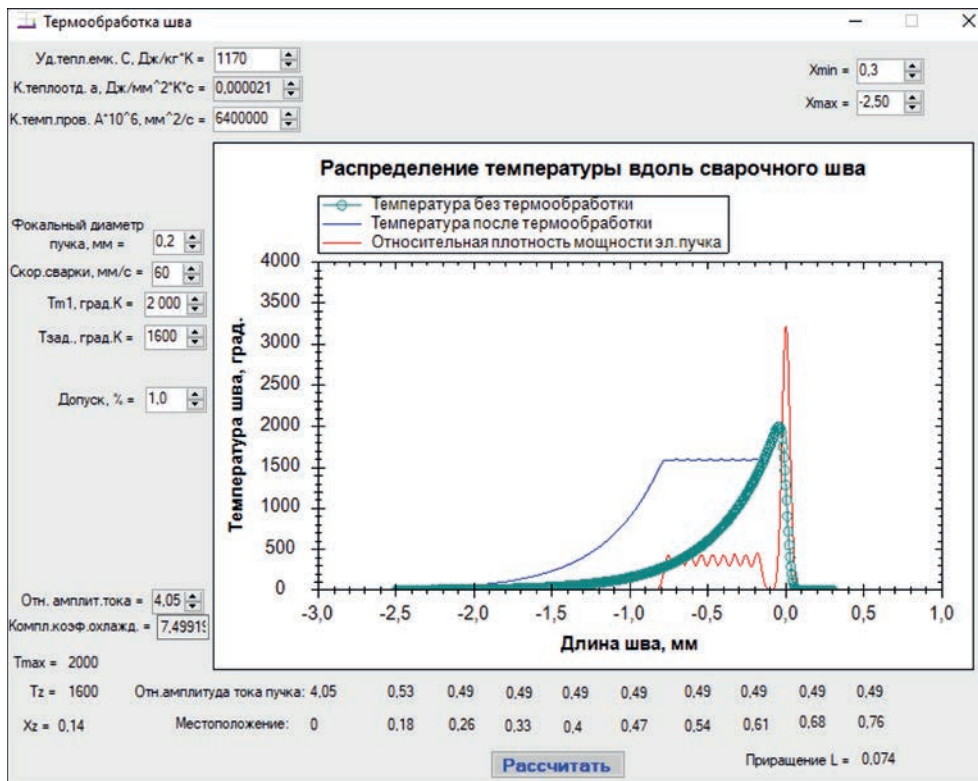


Рис. 3. Квазівстановлений розподіл температури в зварювальному шві з термообробкою шва: $T_{TO} = 1600$ К; $D_{\text{ФП}} = 0,2$ мм; $V_{\text{зв}} = 60$ мм/с

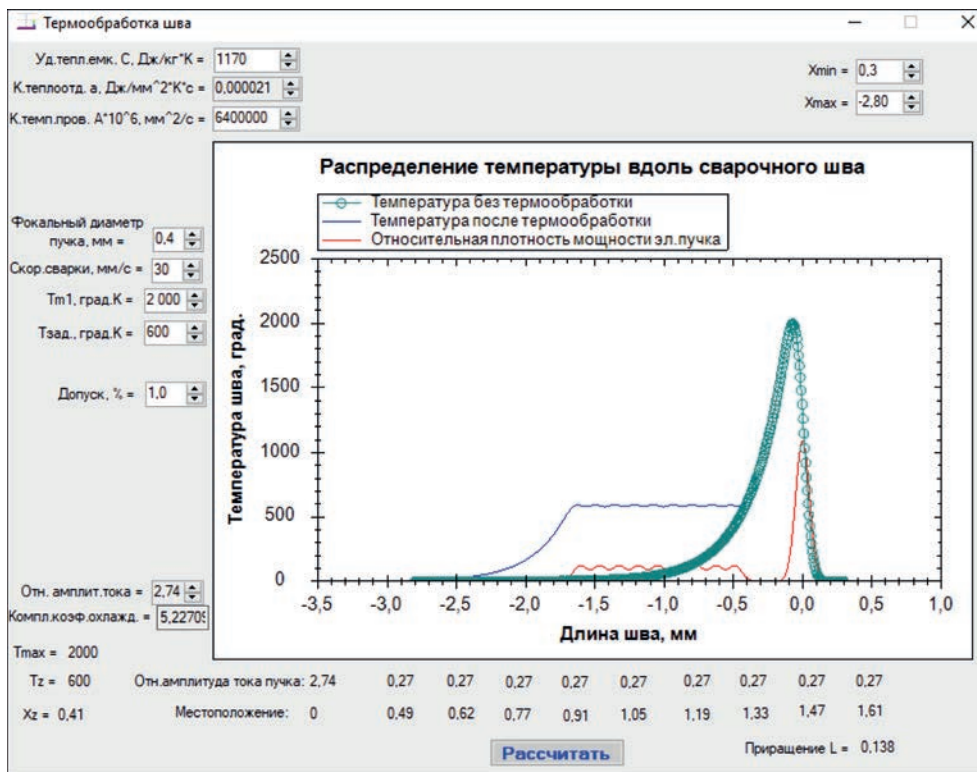


Рис. 4. Квазівстановлений розподіл температури в зварювальному шві з термообробкою шва. $T_{\text{То}} = 600 \text{ K}$; $D_{\text{ФП}} = 0,4 \text{ мм}$; $V_{\text{зв}} = 30 \text{ мм/с}$

– температура в точці з координатою x від дії джерела одиничної потужності, розташованої в точці з координатою x_j . Значення $T_j(x)$ розраховується за формулою (1).

Дискретна апроксимація смугового джерела тепла не тільки полегшує математичний розрахунок. У сучасних електронно-променевих установках використовується програмне управління відхиленням електронного пучка. Пучок переміщується поверхнею стрибками, залишаючись нерухомим деякий час у дискретних точках шва. Якщо період розгортки пучка досить малий, він як би розпадається на ряд еквівалентних дискретних джерел тепла, розташованих один від одного на певній відстані. Для цього випадку справедливі усі наведені вище рівняння [10].

Призначення системи відхилення. Система відхилення є одним з основних елементів управління електронним пучком гармати ПЛ-104, яка входить до комплексу електронно-променевого обладнання, призначеного для виконання у безперервному та імпульсному режимах наступних технологічних робіт:

- зварювання металевих елементів конструкцій;
- різання металевих елементів конструкцій;
- локальний нагрів елементів конструкцій;
- нанесення покриттів на поверхні елементів конструкцій.

Електронно-променева гармата ПЛ-104 закріплюється в маніпуляторі, який монтується у вакуумній камері електронно-променевої установки.

Основні матеріали для виконання технологічних робіт. Для виконання технологічних робіт планується використання зразків з наступних матеріалів:

- титанові сплави ВТ1-0, ВТ1-00, ПТ-3В завтовшки 0,8...3,0 мм;
- нержавіючі сталі типу Х18-Н8 завтовшки 0,8...4,0 мм;
- інтерметалідні сплави на основі алюмінію та титану завтовшки 1...4 мм.

Технічні вимоги до формованих розгорток і до системи управління електронним пучком:

- кількість дискретних зупинок пучка може бути не більше 64;
- частота сканування передбачається 1...1000 Гц;
- сумарні амплітуди розгорток («+» і «-») по осях X і Y на оброблюваній поверхні при зварюванні або різанні можуть встановлюватись в межах 0,5...8,0 мм, а при підігріві елементів конструкції або тиглів з випаровуваним матеріалом – 1...15 мм;
- задані траєкторії розгорток, їх амплітуда та частота сканування повинні відображатись на дисплеї, бути стабільними та не змінюватись в процесі виконання технологічної операції та після неї зберігати відтворюваність встановлених параметрів;
- встановлена траєкторія та її параметри повинні вводиться в пам'ять системи з метою її подальшої швидкої відтворюваності;
- робоча відстань від торця гармати до оброблюваної поверхні може змінюватись в межах 70...120 мм.

На рис. 5 наведено приклад проекту розгортки з супутніми попередньою та подальшою термічною обробкою шва при заданому незмінному значенні фокусу пучка.

У системі комп'ютерного графічного проектування розгорток [7] можна намалювати (апроксимувати) розгортку з використанням 64 точок (із можливістю розширення до 256), що дозволяє блоку розгорток реалізувати частоту 390 Гц та при 256 точках – частоту 100 Гц. Частоту 1000 Гц можна досягти при 25 точках апроксимації траєкторії розгортки. Дані розрахунки наведені для варіанту програмування розгорток, подібних до фігур Ліссажу, які використовуються в основному в аналогових пристроях формування розгорток. На рис. 6 показаний проект подібної розгортки. Розгортку побудовано на 34 точках зупинок розгортки для частоти 735 Гц.

На рис. 5 в проекті розгортки реалізовано 34 точки зупинок розгортки, яка працює на частоті

37 Гц. Мале значення частоти розгортки пов'язане з необхідністю точного завдання часу знаходження пучка у кожній точці зупинки розгортки. Збільшити частоту можна, зменшивши при можливості вимоги до точності завдання часу знаходження пучка в кожній точці зупинки розгортки.

Вимога підвищеної точності завдання часу знаходження пучка в кожній точці зупинки розгортки особливо необхідно враховувати при проектуванні попередньої термообробки зони термічного впливу та подальшого підігріву зварювального шва для створення технологічно заданих умов за температурою та часом впливу тепла, що вводиться. Це, у свою чергу, визначає невелику частоту розгортки електронного пучка, що веде до зменшення відносної швидкості переміщення зони нагріву в процесі зварювання. На рис. 7 показаний проект розгортки з попереднім та наступним підігрівом з різними тепловими впливами відносно амплітуди впливу зва-

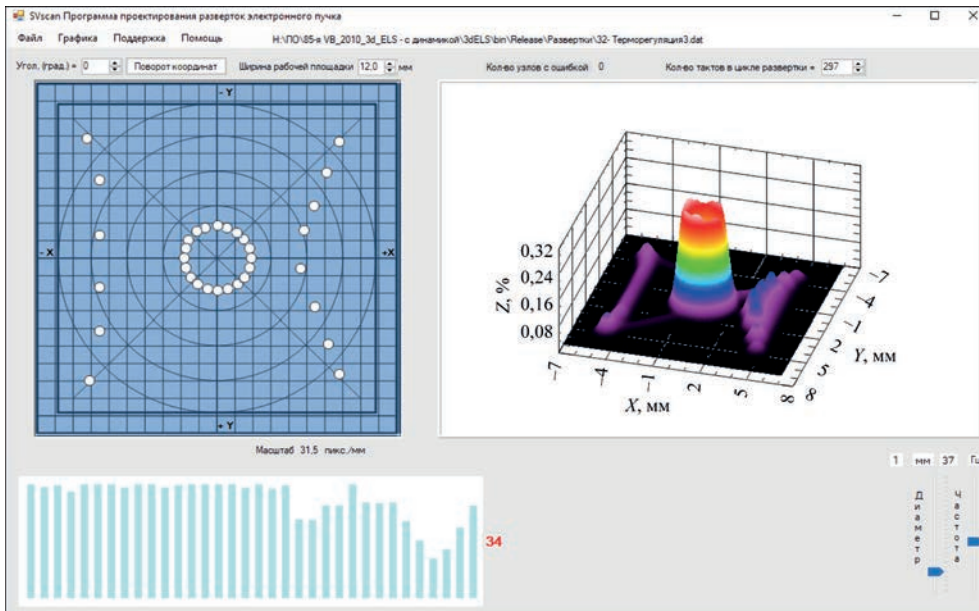


Рис. 5. Проект розгортки з супутніми попередньою та подальшою термічною обробкою шва

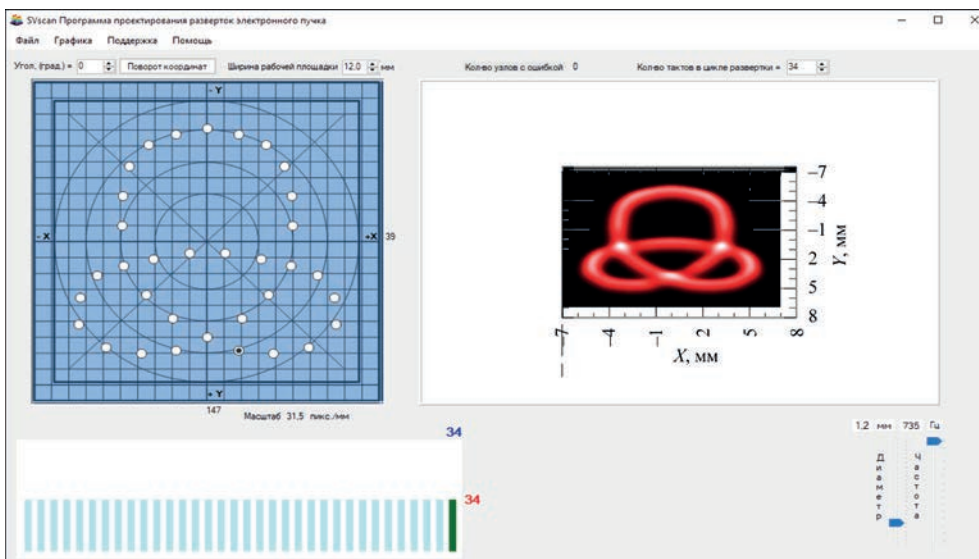


Рис. 6. Проект розгортки фігури Ліссажу

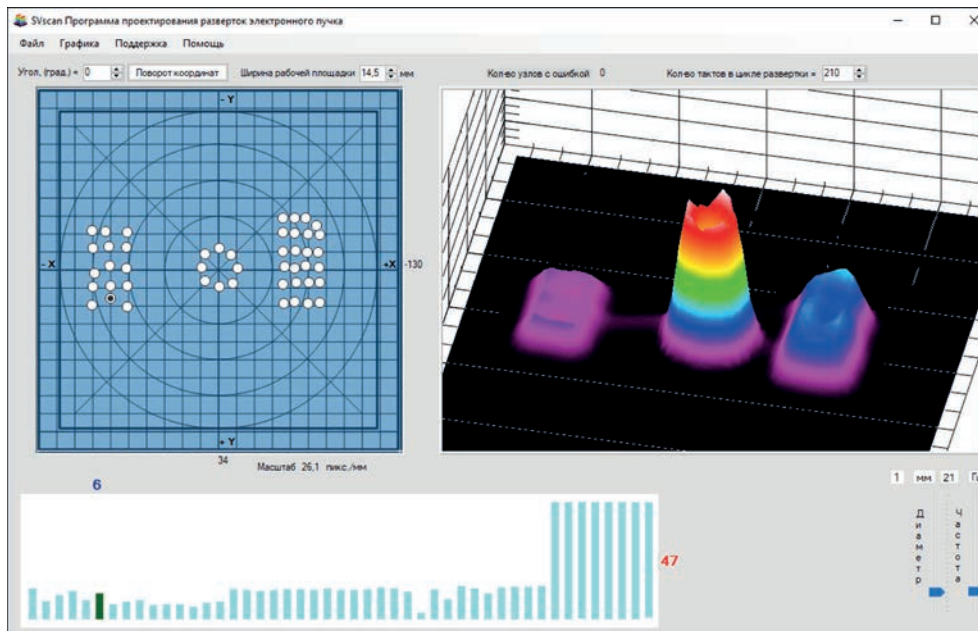


Рис. 7. Проект розгортки з попереднім та наступним підігрівом з різними тепловими впливами

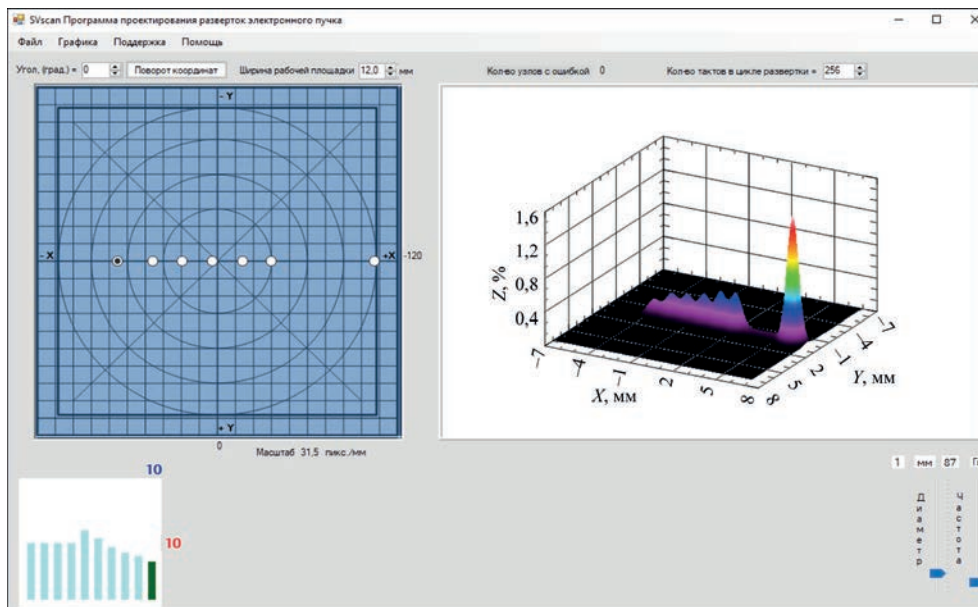


Рис. 8. Проект розгортки для зварювання з подальшою термообробкою шва

ривальної зони розгортки. В проекті використано 47 точок зупинки розгортки з частотою розгортки 21 Гц. При цьому діаметр зварювальної кругової розгортки складає 5...6 мм, а діаметр фокусної плями електронного пучка 1 мм. Відносна швидкість переміщення зони нагріву складе ~ 10 мм/с.

На рис. 8 наведено варіант проекту розгортки з подальшою термообробкою зварного шва.

Висновки

Розроблений алгоритм розрахунку розподілу потужностей композиції дискретних джерел тепла дозволяє синтезувати керуючі дії системи управління електронним пучком для створення будь-якого заданого температурного поля при ЕПЗ з одночасною термообробкою.

Розроблено багатоцільову комп'ютерну технологію проектування розгортки, яка дозволяє реалізувати розгортки з довільним (заданим технологом) результуючим розподілом щільності потужності електронного пучка по точкам його зупинок в зоні впливу на метал для різних задач обробки виробу. При цьому на екрані монітора відображається модельований результуючий розподіл відносної щільності потужності пучка. При проектуванні розгортки задаються її розміри, частота, траєкторія руху пучка, кількість точок зупинки розгортки, миттєва потужність і фокусна відстань електронного пучка в кожній точці зупинки розгортки. У результаті розраховуються синхронізовані з розгорткою зміни струмів відхиляючих котушок і фокусувальної лінзи.

Поєднання зварювального процесу, поперечної та подальшої термообробки призводить до збільшення часу циклу роботи розгортки та зменшення частоти осциляції електронного пучка, що необхідно враховувати при проектуванні розгортки.

Список літератури

1. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. (Под ред. Б.Е. Патона) (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наук. думка.
2. Ланкин Ю.Н., Байштрук Е.Н. (1988) Генераторы разверток электронного пучка для сварки и термообработки. *Автоматическое управление процессами сварки и нанесения покрытий*. Сб. науч. тр., Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, 106–110.
3. Zenker, R. (2002) Electron beam surface treatment and multipool welding – state of the art. *In: EBЕAM 2002, International Conference on High-Power Electron Beam Technology*: 27.-29.10.2002, Hilton Head Island, 12-1–12-5.
4. Ланкин Ю.Н., Мищенко В.П. (1977) Генератор напряжения произвольной формы для развертки электронных пучков. *Информационное письмо №15(1052)*, Киев, Институт электросварки им. Е.О. Патона.
5. Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С. (2016) Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке. *ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 18, 4, 169–187.
6. Ланкин Ю.Н., Бондарев А.А., Довгодько Е.И., Дьяченко В.А. (2009) Система управления разверткой пучка при электронно-лучевой сварке. *Автоматическая сварка*, 9, 16–20.
7. 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, Сб. трудов восьмой международной конференции 11-15 сентября 2017 г., г. Одесса, Украина*.
8. Скрыбинський В.В., Нестеренков В.М., Русинік М.О. (2020) Електронно-променево зварювання з програмуванням розподілу густини потужності променя. *Автоматичне зварювання*, 1, 51-56. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.01.07>

9. Рыкалин Н. Н. (1951) *Расчеты тепловых процессов при сварке*. Москва, Машгиз.
10. Ланкин Ю.Н. (1999) Расчет электронно-лучевого источника тепла для сварки с термообработкой. *Автоматическая сварка*, 11–12, 476–477.

References

1. Nazarenko, O.K., Kajdalov, A.A., Kovbasenko, S.N. et al. (1987) *Electron beam welding*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Lankin, Yu.N., Bajshtruk, E.N. (1988) Generators of electron beam scanning for welding and heat treatment. *In: Automatic control of processes of welding and coating deposition*. Kyiv, PWI, 106-110 [in Russian].
3. Zenker, R. (2002) Electron beam surface treatment and multipool welding – state of the art. *In: Proc. of Int. Conf. on High-Power Electron Beam Technology - EBЕAM 2002 (27-29.10.2002, Hilton Head Island)*, 12-1–12-5.
4. Lankin, Yu.N., Mishchenko, V.P. (1977) Arbitrary-shape voltage generator for electron beam scanning. *Information letter No. 15*. Kyiv, PWI [in Russian].
5. Olshanskaya, T.V., Salomatova, E.S. (2016) Review of modern methods of beam control in electron beam welding. *Vestnik PNIPIU, Mashinostroenie, Materialovedenie*, 18(4), 169–187 [in Russian].
6. Lankin, Yu.N., Bondarev, A.A., Dovgodko, E.I., Dyachenko, V.A. (2009) Control system for beam scanning in electron beam welding. *The Paton Welding J.*, 9, 13-16.
7. Lankin, Yu.N., Soloviov, V.G., Semikin, V.F. et al. (2017) Computer system of graphic design of scannings and modeling of resultant distribution of electron beam current density. *In: Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Welding Technologies and Processing of Materials (Odessa, Ukraine, 11-15 September 2017)*.
8. Skryabinskiy, 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/as2020.01.07>
9. Rykalin, N.N. (1951) *Calculations of thermal processes in welding*. Moscow, Mashgiz [in Russian].
10. Lankin, Yu.N. (1999) *Calculation of electron beam heat source for welding with heat treatment*.

PROGRAMMING ELECTRON BEAM SCAN PATTERN FOR WELDING WITH HEAT TREATMENT

V.G. Soloviov, Yu.M. Lankin, I.Yu. Romanova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Electron beam scan pattern for electron beam welding and heat treatment should ensure the temperature-time parameters of structural-phase transformations in the metal processing zone: degree of heating, nature of heat distribution, cooling and heating rate. Thermal cycles can be regulated by controlling the thermal power of the electron beam, its focusing and space-time position. A multi-purpose computer program was developed for scan pattern design, which allows realization of the scan pattern with an arbitrary (set by the technologist) resulting distribution of electron beam power density by the points of its dwelling in the zone of impact on the metal for welding and heat treatment of the product. As a result, variations of currents of the deflecting coils and focal lens synchronized with the scan pattern, are calculated. 10 Ref., 8 Fig.

Keywords: electron beam technologies, beam power density, electron beam scan pattern, heat treatment, graphic computer design of the scan.

Надійшла до редакції 31.03.2022

XXII Міжнародна науково-технічна конференція (в on line форматі)
ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ТА РЕНОВАЦІЯ ВИРОБІВ
з практичним семінаром

«Зварювання, наплавлення та інші реноваційні технології на підприємствах гірничо-металургійної, машинобудівної промисловості і на транспорті»

15–16 червня 2022 р., м. Київ

Контакти: тел./факс: +38-044-430-85-00, atmu@ism.kiev.ua