

**В. Скальський**

Професор, д-р техн. наук,  
Фізико-механічний інститут  
ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
м. Львів

**І. Лясота**

Студент,  
Національний університет  
«Львівська політехніка»,  
м. Львів

УДК 621.791.722

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ЗА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТИН

*Запропоновано методику розрахунку температурного поля стикового електронно-променевого зварювання пластин змінної товщини з урахуванням нерівномірності розподілу енергії. Враховано вплив тепловідведення пластин, що призводить до зменшення розмірів зон сплавлення та термічного впливу у верхній частині зварного з'єднання. З побудованих термічних циклів та металографічних досліджень встановлено, що миттєва швидкість охолодження змінюється з віддаленням від початку відліку, що зумовлене зміною погонної енергії і призводить до нерівномірності мікроструктури за товщиною з'єднання.*

**електронно-променево зварювання, температурне поле, зона термічного впливу, алюмінієвий сплав**

Під час механічних, втомних, корозійних чи будь-яких інших випробувань зварних з'єднань (ЗЗ) дуже часто руйнування металу відбувається в зоні термічного впливу (ЗТВ). Причиною цьому є складні металургійні процеси, що протікають у цій ділянці під час зварювання і призводять до оплавлення і збільшення розмірів зерен, нерівномірності структури та скупчення різноманітних дефектів. Тому для правильного аналізу результатів, отриманих під час експериментальних досліджень, важливо володіти інформацією про розміри та форму ЗТВ. Одним зі способів отримання цих даних є моделювання термічних циклів у металі шва та колошовній зоні.

Актуальність проблеми полягає ще й у тому, що класичні схеми розрахунку температурних полів (ТП) дають досить наближені результати і не підходять для моделювання ЗТВ, оскільки вони не відображають фізичних явищ, що протікають у пародинамічному каналі і зварювальній ванні. Форма температурного поля розрахована цими методами не відповідає формі реального каналу.

Метою дослідження є розроблення методу розрахунку температурних полів у пластинах за їх електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) з урахуванням нерівномірності розподілу потужності за товщиною.

**Стан проблеми.** Відомі методики розрахунку ТП, побудовані на підходах Н.Н. Рикаліна [1]. Недоліком їх є те, що вони досить наближені і дають змогу розрахувати термічні цикли у найпростіших випадках.

У праці [2] для розрахунку ТП аргоно-дугового зварювання неплавким електродом листів з алюмінієвого сплаву АМг 6 експериментально визначено поправкові коефіцієнти до розрахункових рівнянь Н.Н. Рикаліна. Вони враховують вплив тепловідвідних підкладок і накладок на поширення тепла під час процесу зварювання. Однак отримана методика розрахунку обмежена товщиною зварюваних пластин (до 6 мм), а також їхнім хімічним складом.

Досконалішу методику розрахунку ТП у пришовній зоні під час зварювання металів великих товщин наведено у праці [3]. Для її реалізації канал сплавлення розбивають

на декілька точкових джерел, які одночасно рухаються в середині пластини за напрямом зварювання. Сума ТП окремих джерел тепла визначає загальне ТП. Наведене оптимальне розбиття товщини шва на точкові джерела. Недоліком цієї методики розрахунку є те, що не враховується коефіцієнт теплопередачі з поверхні тіла, за рахунок чого отримуються завищені результати розрахунку ЗТВ.

У праці [4] удосконалено методику Н.Н. Рикаліна для випадку променевого стикового зварювання пластин великої товщини рухомим концентрованим джерелом тепла, нерівномірно розподіленим за товщиною. Розглянуто необмежену однорідну пластину відносно великої товщини, яку прийнято за плоский шар, а тепло- і температуропровідність не залежать від температури. В такій квазістационарній задачі (відносно теплового стану) джерело сконцентровано по осі Z; закон розподілу його потужності — довільний; ніяких обмежень на систему розбиття на підобласті введення тепла не накладається. Квазістационарне ТП у рухомій системі координат описано відомими рівняннями [5]. Показано, що метод дає можливість розрахувати об'ємні ТП, термічні цикли, швидкості охолодження металу шва та ЗТВ за стикового зварювання рухомим концентрованим джерелом з врахуванням нерівномірності розподілу енергії за товщиною пластини. Недоліком методики є те, що вона чутлива до зміщення центра введення теплоти і дає при цьому істотні неоднозначності результатів розрахунку.

**Методика розрахунку температурного поля за електронно-променевого зварювання.** В основу методики покладено встановлену у праці [5] залежність, в яку додатково введено множник  $K$ , запропонований у праці [2]:

$$T(x, y) = \frac{qK}{2\lambda\delta v} \sqrt{\frac{a}{\pi \frac{x}{v}}} \exp\left(-\frac{y^2}{4a \frac{x}{v}} - b \frac{x}{v}\right), \quad (1)$$

де  $q$  — потужність джерела тепла ( $q = UI\eta$ ;  $U$  — напруга пришвидження, В;  $I$  — струм променя, А;  $\eta$  — коефіцієнт корисної дії джерела тепла);  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·град);  $v$  — швидкість зварювання, м/год;  $x, y$  — координати точки, температуру якої визначаємо, м;  $a$  — коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  — товщина зварюваних пластин, м;  $b$  — коефіцієнт температуровіддачі з поверхні пластини ( $b = 2\alpha(\delta C\gamma)^{-1}$ ;  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $C\gamma$  — об'ємна теплосмність металу, Дж/(м<sup>3</sup>·град).

За аналогією з працею [3] канал проплавлення розглядаємо як сукупність лінійних джерел тепла (загальною потужністю  $q$ ), що рухаються з достатньо великою швидкістю в середині пластини у напрямі зварювання (рис. 1). Таким чином, сума температурних полів окремих лінійних джерел визначатиме загальне ТП. Приймаємо, що оптимальною кількістю джерел нагрівання є така, щоб мінімальна товщина шару розбиття лежала у межах 1...5 мм.

Розподіл енергії, що припадає на кожне з джерел тепла, визначаємо за макрошліфами, вирізаними впоперек ЗЗ. Їх розбиття повинно відповідати кількості джерел

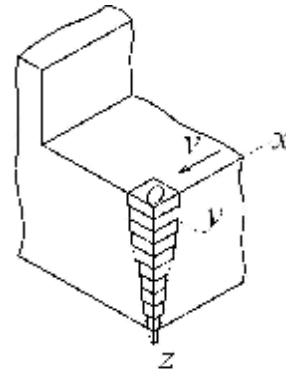


Рис. 1. Схема розміщення рухомих лінійних джерел тепла

нагрівання. Визначивши віддалі  $l_1 \dots l_n$  від лінії сплавлення до центральної осі шва в кожній з областей, розраховуємо відсоток загальної потужності, що припадає на кожне лінійне джерело тепла.

Важливим моментом, на який звернуто увагу у запропонованій методиці і яким не можна нехтувати, є відведення тепла, спричинене зміною товщини зварюваних пластин. У праці [2] експериментально визначено поправковий коефіцієнт до рівнянь (1), який враховує вплив тепловідвідних накладок на процес поширення тепла за аргонодугового зварювання з наскрізним проплавленням пластин з алюмінієвого сплаву АМг 6. Вищеописаний коефіцієнт  $K$  автор [2] умовно називає коефіцієнтом зведення товщини. Це пояснюється тим, що наявність накладки під час зварювання деталей встик впливає на поширення тепла аналогічно збільшенню товщини зварюваних пластин. У кожному окремому випадку його потрібно встановлювати індивідуально.

Для розрахунку миттєвої швидкості охолодження за однопрохідного зварювання з наскрізним проплавленням використовують формулу [1]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -2\pi\lambda C\gamma \frac{(T - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v\delta}\right)^2}, \quad (2)$$

де  $T_0$  — початкова температура тіла або температура попереднього підігрівання, °С;  $q/v$  — ефективна погонна енергія, Дж/м.

Таким чином, з урахуванням викладеного та узагальнюючи відомі літературні дані, алгоритм реалізації методики можна викласти так:

1. Виготовити макрошліф поперечного перерізу ЗЗ та підготувати у прийнятному масштабі його зображення для опрацювання.

2. Розбити за схемою (рис. 1) зображення макрошліфа, з урахуванням прийнятої оптимальної кількості лінійних джерел тепла.

3. Виміряти віддалі  $l_1 \dots l_n$  від центра шва до лінії, що його обмежує для кожного  $i$ -го шару розбиття ( $i=1, \dots, n$ ), які далі для розрахунків приймають за координати  $y_1 \dots y_n$ .

4. Для побудови ізохрон кожного шару розбиття встановити із діаграми стану конкретного сплаву, який

зварювали, температури, до яких нагріваються характерні зони ЗЗ: шов ( $T_1$ ); зона сплавлення ( $T_2$ ); ЗТВ ( $T_3$ ).

5. З урахуванням потрібних для заданого сплаву фізичних констант і отриманих з п. 3 величин за залежністю (1) побудувати ізохрони  $f_j(x, T)$ , де  $j=1, 2, 3$  у кожному шарі розбиття для значень точок по осі  $u$ , максимальні температури яких відповідно  $T_1 - T_3$ . Для цього використати залежність  $q = UI\eta\beta$ , де коефіцієнт  $\beta$  підбирається так, щоб максимум функції  $f_2$  збігався з лінією  $T_2 = const$ .

6. Маючи значення  $\beta$ , отримане в п. 5, побудувати ізохрони  $f_j(x, T)$  та  $f_3(x, T)$ , підбираючи значення  $u_1, u_3$  так, щоб максимум функцій  $f_1(x, T), f_3(x, T)$  збігалися з лініями  $T_1 = const$  і  $T_3 = const$ .

7. Повторити п. 5 і п. 6 для наступних шарів.

8. Маючи значення  $\beta, u_1 - u_3$  для кожного шару, побудувати, виходячи із залежності (1), ізотерми та розподіли температур за осями  $x$  та  $u$  в усіх областях розбиття.

9. Побудувати З – D зображення ТП.

10. Побудувати термічні цикли для будь-якої вибраної точки ЗЗ, в якій цікавить значення швидкості охолодження.

**Приклад розрахунку температурного поля за стикового електронно-променевого зварювання пластин з алюмінієвого сплаву 1201 – Т.** Як приклад, розраховано ТП в околі шва й ЗТВ за наскрізного ЕПЗ пластини товщиною 25 мм з алюмінієвого сплаву 1201 – Т. На віддалі 25 мм від верхньої частини ЗЗ пластини має потовщення 15 мм. Режим зварювання: швидкість 50 м/год, напруга пришвидшення 55 кВ, струм променя 210 мА. Теплофізичні характеристики сплаву:  $\lambda=142$  Вт/(м·град),  $C\gamma=2,72 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град),  $a=50 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\delta=6280$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Ефективний коефіцієнт корисної дії джерела тепла  $\eta=0,95$ .

Враховуючи тепловідведення (потовщення пластини), за даними праці [2] вибрали  $K = 0,9$ . На нашу думку, інтенсивне відбирання тепла відбуватиметься на невеликій глибині зварного стику, тому під час розрахунку ТП значення  $K=0,9$  використовуватимемо лише для перших двох лінійних теплових джерел, а для решти —  $K = 1$ .

З рис. 3 бачимо, що зміна товщини пластини призводить до зменшення розмірів шва, зон сплавлення та термічного впливу. Це пояснюється тим, що за інтенсивного тепловідведення менше розігрівається основний

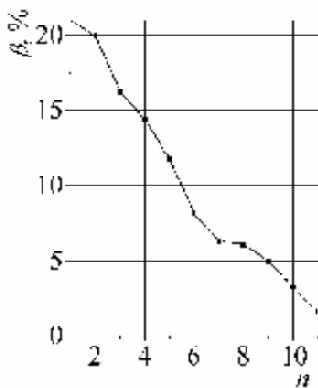


Рис. 2. Значення коефіцієнта  $\beta$  для кожного лінійного джерела тепла

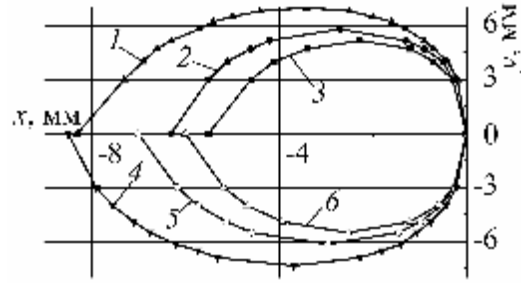


Рис. 3. Зображення ізоTERM на поверхні пластин з врахуванням тепловідведення (1, 2, 3) і за його відсутності (3, 4, 5): è, é — 680 °C; ■, □ — 560 °C; ò, ò — 400 °C

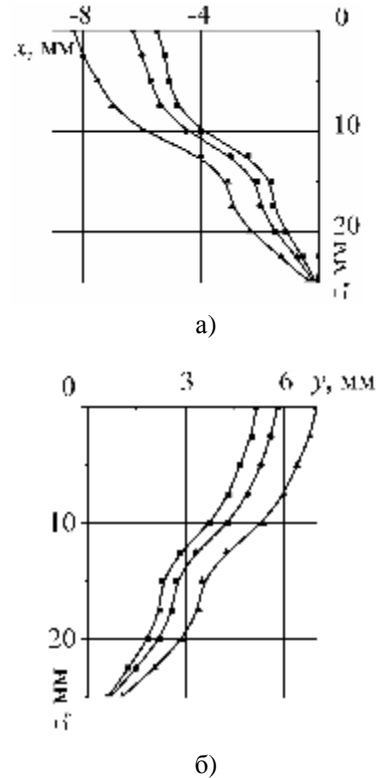


Рис. 4. Зображення ізоTERM у площинах  $xOz$  (а);  $yOz$  — (б): è — 680 °C; ■ — 560 °C; ò — 400 °C

метал, швидше кристалізується розплав зварювальної ванни внаслідок чого структура металу шва є дрібнішою порівняно з ділянками, де немає тепловідведення.

На рис. 4 наведено отримані за розрахунками ізоТЕРМИ, а на рис. 5 і рис. 6 показано об'ємні зображення розподілу температури лінійного джерела тепла у першому шарі та квазістаціонарного ТП за температури 400 °C.

На рис. 7 зображено термічні цикли точок, що розміщені у різних ділянках ЗЗ. Слід зазначити, що миттєва швидкість охолодження змінюється з віддаленням від початку відліку у напрямі осей  $z$  та  $u$ . Так, на поверхні ЗЗ швидкість охолодження у центрі шва ( $y=0$  мм,  $z=0$  мм) є більшою, ніж у зоні сплавлення та ЗТВ (криві 1 — 3). Те саме відбувається і в центральній та нижній частинах ЗЗ (криві 4 — 7). Також бачимо, що вона зростає під час наближення до нижньої частини ЗЗ. Про це свідчить зміна

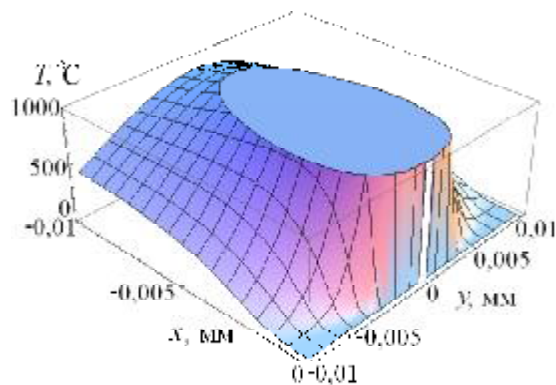


Рис. 5. Просторове зображення розподілу температур першого лінійного джерела тепла

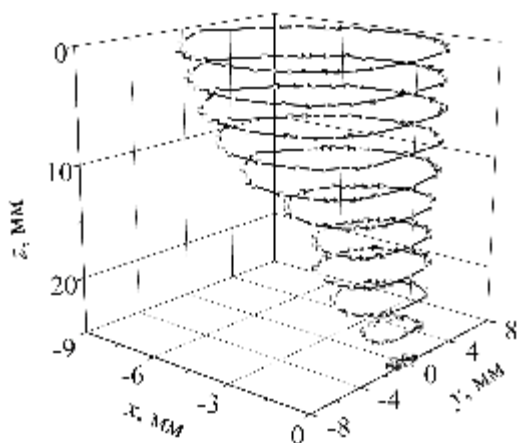


Рис. 6. Тривимірне зображення квазістаціонарного температурного поля ( $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

нахилу кривих 2 — 7. Відомо, що ефективна погонна енергія  $q/v$  у донній частині каналу проплавлення є найменшою, а оскільки у формулі (2) вона знаходиться в знаменнику, то відповідно швидкість охолодження  $dT/dt$  тут буде найбільшою. Така зміна швидкості є причиною нерівномірності мікроструктури ЗЗ вздовж осі  $z$ , а це, як відомо, негативно впливає на міцнісні характеристики ЗЗ.

**Висновки.** Запропоновано методику розрахунку ТП стикового зварювання пластин швидкорухомим концентрованим джерелом тепла з урахуванням нерівномірності розподілу енергії за товщиною під час електронно-променевого зварювання.

За розробленим алгоритмом побудовано термічні цикли, тривимірні зображення ізотерм та розподілу температур характерних ділянок ЗЗ алюмінієвого сплаву.

Запропонована методика розрахунку ЗТВ дала змогу оцінити зменшення зони сплавлення й ТП у верхній частині ЗЗ, спричиненого тепловідведенням.

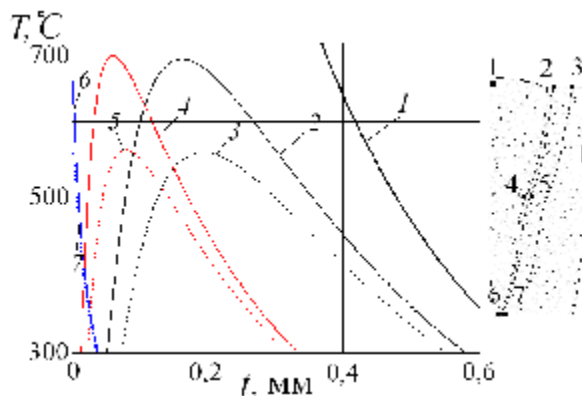


Рис. 7. Термічні цикли точок, розміщених у різних зонах ЗЗ: 1 —  $y = 0\text{ мм}$ ,  $z = 0\text{ мм}$ ; 2 —  $y = 5,16\text{ мм}$ ,  $z = 0\text{ мм}$ ; 3 —  $y = 5,8\text{ мм}$ ,  $z = 0\text{ мм}$ ; 4 —  $y = 2,83\text{ мм}$ ,  $z = 12,5\text{ мм}$ ; 5 —  $y = 3,3\text{ мм}$ ,  $z = 12,5\text{ мм}$ ; 6 —  $y = 0,63\text{ мм}$ ,  $z = 25\text{ мм}$ ; 7 —  $y = 0,75\text{ мм}$ ,  $z = 25\text{ мм}$

## Література

1. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машиностроение, 1951. — 296 с.
2. Кодолов В.Д. К расчету термического цикла аргонодуговой сварки неплавящимся электродом листов из сплава Амгб // Сварочное производство. — 1963. — №4. — С. 14—17.
3. Стронский А.Е., Левин В.В. Расчет температурного поля в околошовной зоне при электроннолучевой сварке металлов большой толщины // Сварочное производство. — 1982. — №5. — С. 3—4.
4. Кархин В. А., Пилипенко А. Ю. Моделирование термических циклов в металле шва и ЗТВ при лучевых способах сварки пластин большой толщины // Сварочное производство. — 1996. — №11. — С. 25—27.
5. Кархин В. А. Тепловые основы сварки. — Л.: Изд-во Ленингр. гос. ин-та, 1990. — 100 с.

Отримана 19.06.09

V. Skalsky, I. Lyasota

### Calculating methods of heat-affected zone according to electron-beam welding of plates

H.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv; National University «Lvivska Politechnika», Lviv

Methods of temperature field calculation of electron-beam welding plate of variable thickness was suggested, including the unsteadiness of energy distribution. The influence of that abstraction was taken into account which causes the decrease in size of fusing and thermic affects in upper part of welding joints. Resulting from the thermic cycles and metallographic investigations, instant cooling speed is changing, moving off from the initial reading. It is caused by linear energy and leads to unsteadiness of microstructure according to the thickness of joining.