

УДК 621. 791. 722

В.Р.Скальський, І.М.Лясота

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ПРИШОВНІЙ ЗОНІ З'ЄДНАНЬ, ВИКОНАНИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Запропоновано методику розрахунку температурного поля стикового електронно-променевого зварювання пластин з урахуванням нерівномірності розподілу енергії. За побудованими термічними циклами та металографічними дослідженнями встановлено, що миттєва швидкість охолодження у зоні термічного впливу змінюється внаслідок зменшення погонної енергії і це призводить до нерівномірності мікроструктури за товщиною з'єднання.

**Вступ.** Під впливом корозійно-механічних чинників у зварних з'єднаннях (ЗЗ) дуже часто руйнування металу відбувається в зоні термічного впливу (ЗТВ). Причиною цьому є складні металургійні процеси, що протікають у цій області 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, форму та мікроструктуру ЗТВ. Одним із способів отримання таких даних є моделювання термічних циклів в металі шва та пришовній 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 даними методами не відповідає формі реального каналу.

*Метою* дослідження є розробити метод розрахунку температурних полів у пластинах за електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) їх з урахуванням нерівномірності розподілення потужності за товщиною ЗЗ, а також встановити мікроструктуру та механічну неоднорідність ЗТВ зварних з'єднань алюмінієвого сплаву марки 1201-Т.

**Методика розрахунку температурного поля за електронно-променевого зварювання.** Відомі методи розрахунку ТП побудовані на підходах Н. Н. Рикаліна [1]. Їх недоліком є те, що вони досить наближені і дають змогу розрахувати термічні цикли у найпростіших випадках, без урахування нерівномірності проплавлення за товщиною ЗЗ.

Відомий також підхід до розрахунку ТП у пришовній зоні за променевого зварювання металів великих товщин [2]. Канал проплавлення тут умовно приймають за низку точкових джерел, які одночасно рухаються всередині пластини у напрямі зварювання. Недоліком даної методики розрахунку є те, що не враховується коефіцієнт теплопередачі з поверхні тіла, за рахунок чого отримують завищені результати розрахунку ЗТВ.

У праці [3] удосконалено методику Н.Н. Рикаліна для променевого стикового зварювання пластин великої товщини рухомим концентрованим джерелом тепла, нерівномірно розподіленим за товщиною. Досліджено необмежену однорідну пластину, відносно великої товщини, яку прийнято за плоский шар, а тепло- і температуропровідність – не залежними від температури. В цій квазістаціонарній 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. Метод дає можливість побудувати розподіли температур, термічні цикли, розрахувати швидкості охолодження металу шва та ЗТВ за стикового зварювання рухомим концентрованим джерелом з урахуванням нерівномірності розподілу енергії за товщиною пластини. Однак така методика чутлива до зміщення центра введення тепла, тому отримані за її алгоритмом результати розрахунків є неоднозначними.

В основу запропонованого нами методу покладено встановлену у праці [1] залежність, в яку додатково введено множник  $K$ , що враховує відведення тепла з поверхні ЗЗ:

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

де  $q$  – потужність джерела тепла ( $q = U \cdot I \cdot \eta$ ;  $U$  – напруга прискорення;  $I$  – струм променя;  $\eta$  – коефіцієнт корисної джерела тепла);  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $v$  – швидкість зварювання;  $x$ ,

$y$  – координати точки, температуру якої визначаємо;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\delta$  – товщина зварюваних пластин;  $b$  – коефіцієнт температуровіддачі з поверхні пластини ( $b = 2 \cdot \alpha \cdot (\delta \cdot C\gamma)^{-1}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $C\gamma$  – об'ємна теплоємність металу).

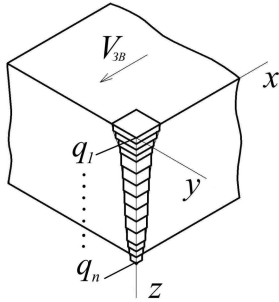


Рис. 1. Схема моделювання розбиття рухомих лінійних джерел тепла за товщиною пластини.

Канал проплавлення розглядаємо як сукупність лінійних джерел тепла  $q_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) загальною потужністю  $q$ , що рухаються з достатньо високою швидкістю всередині 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 макрошліфом, вирізаним упоперек ЗЗ. Отже кількість шарів відповідає кількості джерел нагрівання.

Для розрахунку миттєвої швидкості охолодження у кожному шарі скористаємося формулою [1]:

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

де  $T_0$  – початкова температура тіла, або температура попереднього підігрівання;  $q/v$  – ефективна погонна енергія.

**Дослідження особливостей зварного з'єднання** [4]. Побудуємо температурне поле в околі шва та ЗТВ за наскрізного ЕПЗ пластини товщиною 20 мм з алюмінієвого сплаву марки 1201 – Т. На відстані 25 мм від шва пластини має потовщення 15 мм. Режим зварювання: швидкість 70 м/год, напруга прискорення 60 кВ, струм променя 120 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,  $\alpha = 6280$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Ефективний коефіцієнт корисної дії джерела тепла згідно з літературними даними прийняли  $\eta = 0,89$ .

На рис. 2 і рис. 3 приведено отримані нами ізотерми у площинах  $yOz$  та  $xOy$ , а на рис. 4 – показано об'ємне зображення розподілу температур лінійного джерела тепла у проміжку між верхньою і нижньою поверхнями пластин.

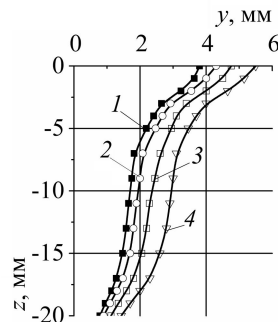


Рис. 2. Ізотерми у площині  $yOz$ : 1 – 580 °C; 2 – 500 °C; 3 – 400 °C; 4 – 300 °C.

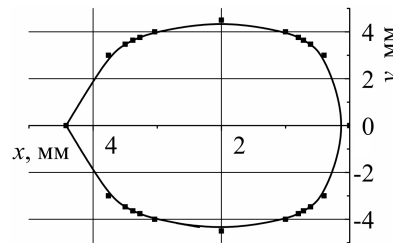


Рис. 3. Ізотерма у площині  $xOy$  на поверхні пластин ( $T = 400$  °C).

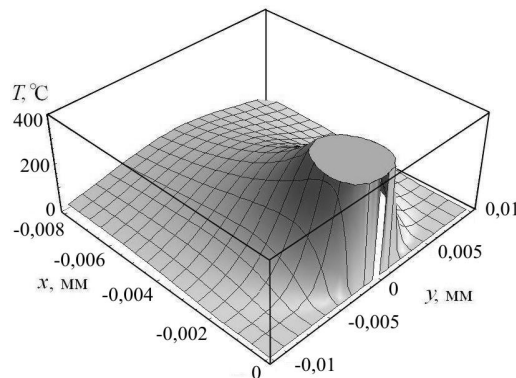


Рис. 4. Просторовий розподіл температур всередині товщини ЗЗ (наприклад, сьомого лінійного джерела тепла).

На рис. 5. показано термічні цикли точок, що розміщені у різних ділянках ЗЗ. Відзначимо, що миттєва швидкість охолодження зростає від верхньої до нижньої поверхні пластини. Про це свідчить зміна нахилу кривих 1 – 3 на стадії охолодження. Відомо, що ефективна погонна енергія  $q/v$  у донній частині каналу проплавлення є найменшою, тому відповідно швидкість охолодження тут буде найбільшою. Така її зміна є причиною нерівномірності мікроструктури ЗЗ.

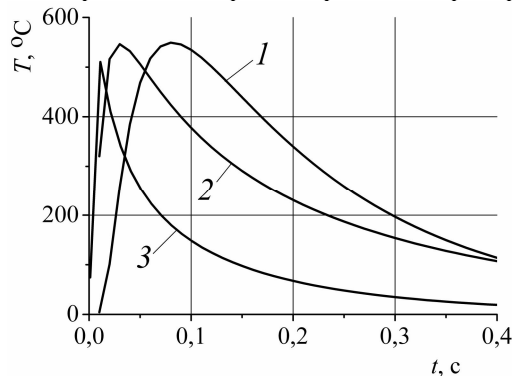


Рис. 5. Термічні цикли точок розміщених у різних зонах ЗЗ:  
1 –  $y = 3,76$  мм,  $z = 0$  мм; 2 –  $y = 1,84$  мм,  $z = 10$  мм; 3 –  $y = 0,83$  мм,  $z = 20$  мм.

На рис. 6. подано мікроструктуру пришовної зони та графік розподілу температур центральної частини ЗЗ. Порівнюючи розрахункові дані з металографічними дослідженнями бачимо, що структурні зміни у ЗТВ починаються вже за температури  $450$  °C і закінчуються плавленням ( $580$  °C). Таким чином, у даному випадку розмір ЗТВ становить приблизно  $0,6$  мм.

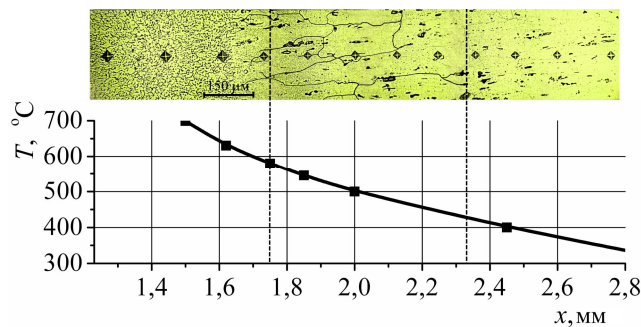


Рис. 6. Мікроструктура пришовної зони та розподіл температур у сьомому шарі.

Відомо також [5], що термозміцнений алюмінієвий сплав системи Al–Cu–Mn з максимальним вмістом міді 7 % (1201-T), який під час зварювання повільно охолоджували, за кімнатної температури складається з розчину міді в алюмінії, часточок зміцнювача  $\text{CuAl}_2$ , рівномірно розподілених на межі і об'єму зерен, та нерозчинних фаз, утворених легувальними домішками. Оскільки під час ЕПЗ швидкості охолодження металу достатньо великі, фаза  $\text{CuAl}_2$  не встигає виділитись і кінцева мікроструктура складається з однорідного розчину міді в алюмінії з 7% Cu. Проте такий розчин є нестійким, тому навіть за кімнатної температури в ньому протікають процеси, що підвищують його міцність. На рис 6. чітко видно видовжені вкраплення зміцнювача  $\text{CuAl}_2$  по границях зерен (чорні плями) в розчині, форма яких зумовлена напрямленим тепловідведводом до основного металу ЗЗ.

### Висновки.

Отримані результати розрахунку зони термічного впливу зварного з'єднання пластин сплаву 1201-T, виконаного електронно-променевим зварюванням, дають змогу точніше оцінити її розміри та геометрію.

Внаслідок зміни швидкості охолодження за товщиною пластин розміри шва у її верхній та нижній частинах різні, відповідно відрізняються своєю мікроструктурою і пришовні зони.

1. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машиностроение, 1951. – 296 с.
2. 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.
3. 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.
4. Skalsky V. R. and Lyasota I. M. Estimation of the heat-affected zone for the electron-beam welding of plates // Materials science. – 2010. – Vol. 46, – No 1, 115 – 123.
5. Никифоров Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. – М., Машиностроение, 1972, – 204 с.