

УДК 621. 791. 722

ОЦІНКА ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ЗА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТИН

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, І. М. ЛЯСОТА

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

Описано методику та подано окремі експериментальні результати розрахунку зони термічного впливу (ЗТВ) стикового електронно-променевого зварювання пластин змінної товщини з урахуванням нерівномірності розподілу енергії. Показано, що тепловідвід внаслідок потовщення пластин призводить до зміни розмірів ЗТВ у верхній частині зварного з'єднання. Встановлено, що миттєва швидкість охолодження змінюється за віддалення від початку відліку внаслідок зміни погонної енергії і це зумовлює нерівномірність мікроструктури за товщиною з'єднання.

Ключові слова: *електронно-променево зварювання, алюмінієвий сплав, зона термічного впливу, температурне поле, тепловідведення, ізохрона.*

Найчастіше зварні з'єднання (ЗЗ) руйнуються по межі зони сплавлення. Причиною цього є складні металургійні процеси, що тут протікають і призводять до порушень мікроструктури та утворення різноманітних дефектів. Одним з визначальних факторів, що характеризує якість ЗЗ, є розмір зони термічного впливу (ЗТВ) та її складників. Отримати такі дані можна, змодельовавши температурне поле (ТП) металу шва та пришовної зони, яке виникає під час зварювання. Класичні схеми розрахунку ТП дають досить наближені результати і непридатні для моделювання ЗТВ за променевого зварювання, оскільки не враховують основних фізичних явищ у пародинамічному каналі і зварювальній ванні. Форма температурного поля, змодельована цими методами, не відповідає реальному стану в каналі проплавлення.

Мета дослідження – вдосконалити методику та побудувати алгоритм розрахунку ТП у пластинах за стикового електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) їх з урахуванням нерівномірності розподілу потужності за товщиною.

Усі відомі схеми моделювання ТП побудовані на підходах Н. Н. Рикаліна [1]. Деякі автори [2–4] математично удосконалили його рівняння і, застосувавши в обчисленнях комп'ютерну техніку, дещо підвищили якість та точність графічних залежностей, що ілюструють розподіл ТП. Проте недоліком таких методик є те, що вони досить наближені і дають змогу розрахувати термічні цикли у найпростіших випадках без урахування нерівномірності проплавлення за товщиною ЗЗ.

У праці [5] для розрахунку термічних циклів аргано-дугового зварювання неплавким електродом листів з алюмінієвого сплаву марки АМг6 експериментально визначено поправкові коефіцієнти до рівнянь Н. Н. Рикаліна, які ураховують вплив тепловідвідних підкладок і накладок на поширення тепла під час зварювання і залежать головню від властивостей матеріалу, поперечного перерізу та розміщення накладок відносно осі шва. Однак така методика дає некоректні результати під час розрахунків ЗТВ за зварювання пластин великих товщин (більше 10 mm).

Досліджено [6] ТП за аргоно-дугового зварювання пластин товщиною 8 mm з алюмінієвого сплаву Д16. Встановлено, що потік захисного газу суттєво впливає на розподіл тепла в зоні ЗЗ, знижуючи температуру деяких точок до 30%. Для врахування такого охолодження запропоновано додатково ввести в розрахунок кругове джерело тепла, яке за характером розподілу ТП аналогічне струменю аргону, але має зворотну дію. Проте не наведено експериментальних даних, що підтверджували б правильність цієї методики.

Досконаліший підхід до розрахунку ТП у пришовній зоні за променевого зварювання металів великих товщин висвітлено у праці [7]. Канал проплавлення тут умовно прийняли за низку точкових джерел, які одночасно рухаються в середині пластини у напрямку зварювання. Таким чином, сума полів від окремих теплових джерел визначає загальне ТП. Наведено оптимальну кількість джерел нагрівання та розподіл їх потужності за товщиною з'єднання. Але тут не враховують коефіцієнт теплопередачі з поверхні тіла, через що отримують завищені результати розрахунку ЗТВ.

У праці [8] 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 – незалежними 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 накладено. Стаціонарне ТП у рухомій системі координат описано відомими рівняннями [2]. 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 неоднозначні.

Обґрунтування методики розрахунку температурного поля. В її основу покладено теж встановлену у праці [1] залежність, в яку додатково введено множник K з праці [5]:

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

де q – потужність джерела тепла, W; λ – коефіцієнт теплопровідності, W/(m·grad); v – швидкість зварювання, m/h; x, y – координати точки, температуру якої визначаємо, m; a – коефіцієнт температуропровідності, m²/s; δ – товщина зварюваних пластин, m; b – коефіцієнт температуровіддачі з поверхні пластини ($b = 2 \cdot \alpha \cdot (\delta \cdot C\gamma)^{-1}$; α – коефіцієнт тепловіддачі, W/(m²·grad); $C\gamma$ – об'ємна теплоємність металу, G/(m³·grad), s⁻¹). Значення q пропонуємо визначити із відомої залежності, ввівши туди додатково коефіцієнт β :

$$q = U \cdot I \cdot \eta \cdot \beta, \quad (2)$$

де U – напруга пришвидшення, V; I – струм променя, A; η – коефіцієнт корисної дії джерела тепла.

Канал проплавлення розглядаємо [7] як сукупність лінійних джерел тепла (загальною потужністю q), що рухаються з достатньо великою швидкістю

в середині пластини у напрямку зварювання. Таким чином, сума полів від окремих теплових лінійних джерел визначатиме загальне ТП. Оптимальною приймаємо таку кількість джерел нагрівання, щоб мінімальна товщина шару розбиття лежала у межах 1...5 mm.

Для вираження розподілу енергії, що припадає на кожне з джерел тепла, макрошліфи, вирізані уперек ЗЗ розбиваємо за глибиною (рис. 1). Вимірявши відстані $l_1...l_n$ від лінії сплавлення до центральної осі шва в кожній з областей, розраховуємо відсоток загальної потужності β , що припадає на кожне лінійне джерело тепла.

Важливим моментом у цій методиці (який не можна нехтувати) є відведення тепла через зміну товщини зварюваних пластин. У праці [5] експериментально знайдено поправковий коефіцієнт до рівнянь Рикаліна [1], який урахує вплив тепловідвідних накладок на поширення тепла за аргонодугового зварювання з наскрізним проплавленням пластин з алюмінієвого сплаву АМг6. Коефіцієнт K автор праці [5] умовно називає коефіцієнтом приведення товщини. Це пояснює тим, що притискачі під час зварювання деталей у стик впливають на поширення тепла так само, як потовщення пластин. У кожному окремому випадку його потрібно встановлювати індивідуально.

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

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

де T_0 – початкова температура тіла або температура попереднього підігріву, °C; q/v – ефективна погонна енергія, G/m.

Отже, урахувавши викладене та узагальнюючи відомі літературні дані, алгоритм розрахунку ЗТВ за запропонованою методикою можна реалізувати у такій послідовності:

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 товщини шару, що дасть оптимальну кількість лінійних джерел тепла.

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

4. Для побудови ізохрон кожного шару розбиття встановити із діаграми стану конкретного зварювального сплаву температури нагріву характерних зон ЗЗ: шов (T_1); зона сплавлення (T_2); ЗТВ (T_3).

5. З урахуванням необхідних для сплаву фізичних констант та отриманих з п. 3 величин y_i за залежністю (1) побудувати ізохрони $f_j(x, T)$, де $j = 1, 2, 3$ у кожному шарі розбиття для значень точок по осі y , максимальні температури яких відповідно $T_1 - T_3$. Для цього використати залежність (2), де коефіцієнт β підібрати так, щоб максимум функції f_2 збігався із лінією $T_2 = \text{const}$ (рис. 2).

6. Маючи значення β , побудувати ізохрони $f_1(x, T)$ та $f_3(x, T)$, підбираючи

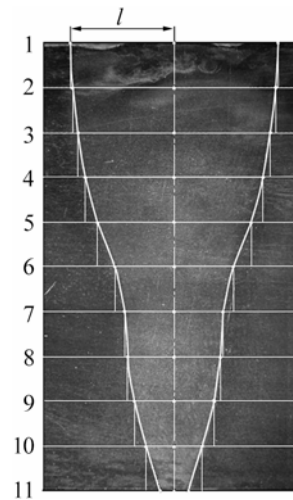


Рис. 1. Схема розбиття фотознімка макрошліфа зварного з'єднання.

Fig. 1. Chart of lying out the macrograph of the welded joint.

значення y_1 і y_3 так, щоб максимуми функцій $f_1(x, T)$, $f_3(x, T)$ збіглися з лініями $T_1 = \text{const}$ і $T_3 = \text{const}$.

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

8. Маючи значення β , $y_1 - y_3$ для кожного шару, побудувати, виходячи із залежності (1), ізотерми та розподіли температур за осями x та y в усіх областях розбиття.

9. Побудувати 3D зображення ТП.

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

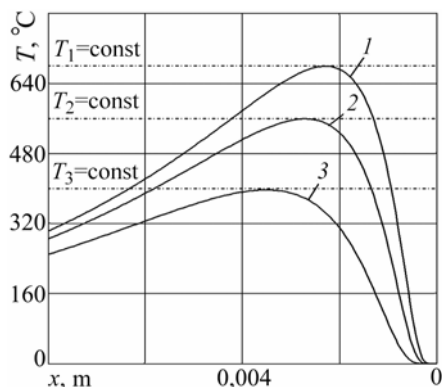


Рис. 2. Зображення ізохрон першого лінійного джерела тепла: 1 – $f_1(x, T)$; 2 – $f_2(x, T)$ та 3 – $f_3(x, T)$ за ЕПЗ пластини товщиною 25 mm для різних значень координати y ($y_1 = 5,16$ mm, $y_2 = 5,8$ mm, $y_3 = 7$ mm).

Fig. 2. Image of temperatures distribution of the first linear heat source: 1 – $f_1(x, T)$; 2 – $f_2(x, T)$ and 3 – $f_3(x, T)$ under electron-beam welding of plate 25 mm of thickness for different values of coordinate y ($y_1 = 5.16$ mm, $y_2 = 5.8$ mm, $y_3 = 7$ mm).

Оцінка ЗТВ за стикового ЕПЗ пластин з алюмінієвого сплаву 1201-Т.

Для прикладу розраховано ТП в околі шва та ЗТВ за наскрізного ЕПЗ пластин товщиною $\delta = 10$ та 25 mm зі сплаву 1201-Т. Останні на відстані 25 mm від верхньої частини ЗЗ мають потовщення 15 mm. Режим зварювання наведено в таблиці. Теплофізичні характеристики сплаву: $\lambda = 142$ W/(m·grad), $C\gamma = 2,72 \times 10^6$ G/(m³·grad), $a = 50 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $\alpha = 6280$ W/(m²·grad). Ефективний коефіцієнт корисної дії джерела тепла $\eta = 0,95$.

Режим ЕПЗ пластин з алюмінієвого сплаву 1201-Т

Товщина пластин δ , mm	Струм променя I , mA	Напруга при швидкості U , kV	Швидкість зварювання v , m/h
10	100	45	40
25	210	55	50

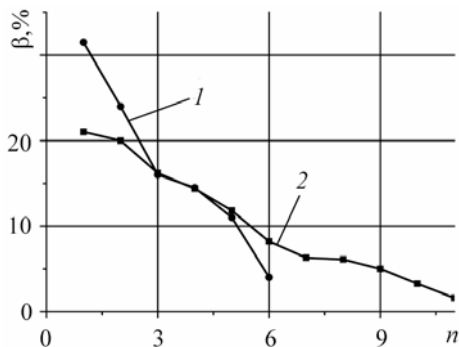


Рис. 3. Значення коефіцієнта β для кожного лінійного джерела тепла: 1 – $\delta = 10$ mm; 2 – 25 mm.

Fig. 3. Value of coefficient β for each linear source of heat: 1 – $\delta = 10$ mm; 2 – 25 mm.

Кількість лінійних джерел тепла для пластин товщиною 10 і 25 mm відповідно така: $n^{(10)} = 6$, $n^{(25)} = 11$. Щоб визначити розміри шва та ЗТВ у донній частині ЗЗ, умовно приймали, що останнє джерело тепла рухається за межами зварювального стику (у флюсовій підкладці). Під час розрахунку ТП за ЕПЗ пластин товщиною 25 mm, враховуючи тепловідвід (потовщення пластини), за даними праці [5] вибрали $K = 0,9$. На нашу думку, інтенсивне відведення тепла буде 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 $K = 1$. Встановлено (рис. 3) зміну значень коефіцієнта β залежно від номера лінійного джерела тепла.

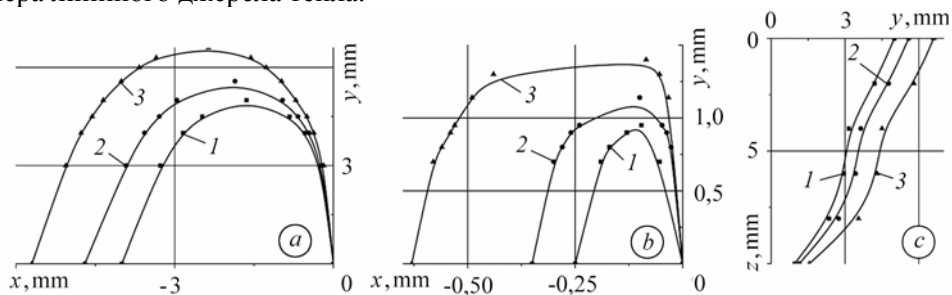


Рис. 4. Зображення ізотерм у площинах xOy на верхній (а) та нижній (б) поверхнях ЗЗ та yOz (с) за ЕПЗ пластин товщиною 10 mm: 1 – 680°C; 2 – 560°C; 3 – 400°C (x – напрям вздовж шва; y – впоперек шва; z – за його глибиною).

Fig. 4. Image of isotherms in the planes of xOy on the upper (a) and lower (b) surfaces of the welded joint and yOz – (c) under electron-beam welding of plates 10 mm in thickness: 1 – 680°C; 2 – 560°C; 3 – 400°C (x – direction is along a weld; y – direction is across a weld; z – direction is according to the depth of a weld).

За результатами розрахунку ТП пластин товщиною 10 mm у різних координатних площинах побудували ізотерми (рис. 4). Точки, що нагрівалися до 400°C під час ЕПЗ пластин товщиною 10 та 25 mm, зображено на рис. 5. Як бачимо, поля є нерівномірні за всіма просторовими напрямками. Така випукло-увігнута поверхня межі сплавлення є причиною складної форми осей кристалітів та нерівномірності мікроструктури за перерізом ЗЗ.

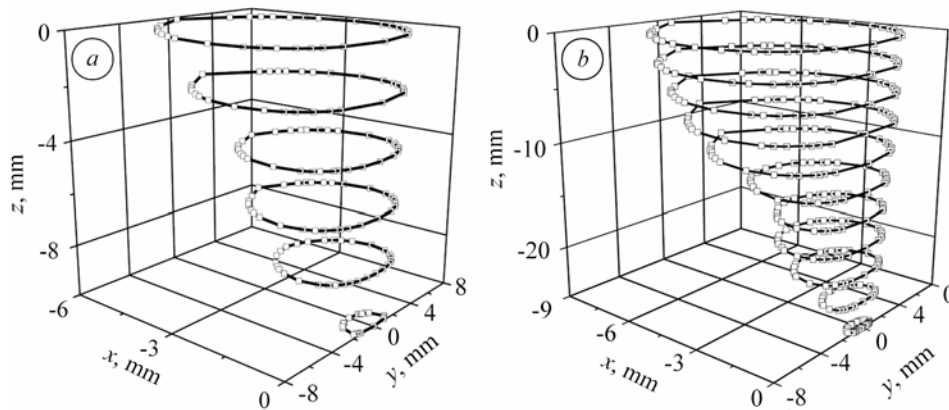


Рис. 5. Тривимірний розподіл квазістаціонарного ТП для лінійних джерел тепла у шарах за ЕПЗ пластин товщиною 10 mm (а) та 25 mm (б) ($T = 400^\circ\text{C}$).

Fig. 5. Three-dimensional distribution of the stationary temperature field for the linear heat sources in layers under electron-beam welding of plates of thickness 10 mm (a) and 25 mm (b) ($T = 400^\circ\text{C}$).

На рис. 6 об'ємно подано розподіл температур лінійного джерела тепла у першому шарі за ЕПЗ пластин з алюмінієвого сплаву 1201-Г товщиною 10 mm. На рис. 7. – термічні цикли точок, що розміщені у різних ділянках ЗЗ з $\delta = 25$ mm (криві 1–3) та $\delta = 10$ mm (криві 4, 5). Відмітимо, що миттєва швидкість охолодження змінюється з віддаленням від початку відліку у напрямі осей z та y. Зокрема, вона вища на поверхні ЗЗ у центрі шва ($y = 0$ mm, $z = 0$ mm), ніж

у зоні сплавлення та ЗТВ (криві 1, 2). Те саме маємо у центральній та нижній частинах ЗЗ, про що свідчить зміна нахилу кривих 2–5. З графіків (рис. 4с та 5) видно, що потужність q у донній частині каналу проплавлення найменша, а значить, ефективна погонна енергія q/v теж мінімальна, тому згідно з формулою (3) швидкість охолодження тут буде найбільша. Така зміна швидкості є причиною нерівномірності мікроструктури ЗЗ уздовж осі z (рис. 8). Мікроструктура металу шва і зони сплавлення верхньої частини з'єднання (рис. 8а) є помітно крупніша, ніж нижньої (рис. 8б), що негативно впливає на міцнісні характеристики ЗЗ.

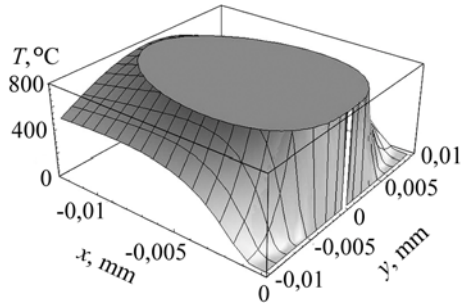


Рис. 6. Просторове зображення розподілу температур першого лінійного джерела тепла за ЕПЗ пластин товщиною 10 мм.

Fig. 6. Spatial image of temperatures distributing of the first linear heat source under electron-beam welding of plates of 10 mm in thickness.

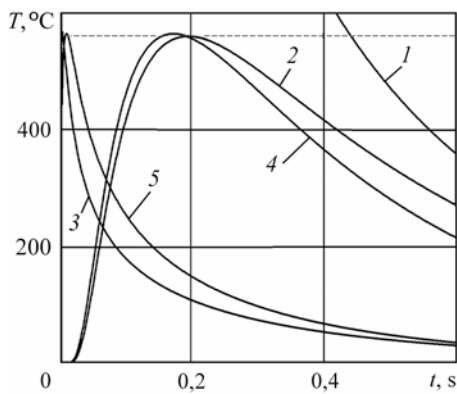


Рис. 7. Термічні цикли точок, розміщених у різних зонах ЗЗ за ЕПЗ пластин: 1 – $y = 0$ мм, $z = 0$ мм; 2 – $y = 5,8$ мм, $z = 0$ мм; 3 – $y = 0,75$ мм, $z = 25$ мм; 4 – $y = 5,58$ мм, $z = 0$ мм; 5 – $y = 1,14$ мм, $z = 10$ мм.

Fig. 7. Thermal cycles of points placed in the different areas of the welded joints under electron-beam welding of plates: 1 – $y = 0$ mm, $z = 0$ mm; 2 – $y = 5.8$ mm, $z = 0$ mm; 3 – $y = 0.75$ mm, $z = 25$ mm; 4 – $y = 5.58$ mm, $z = 0$ mm; 5 – $y = 1.14$ mm, $z = 10$ mm.

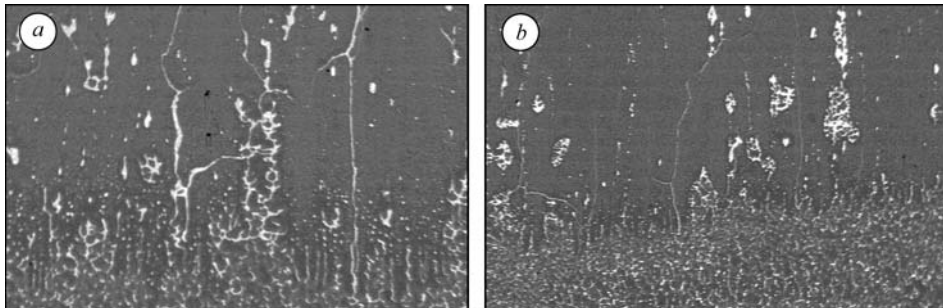


Рис. 8. Мікроструктура верхньої (а) та нижньої (б) ділянок зон сплавлення ЗЗ алюмінієвого сплаву 1201-Т товщиною 25 мм, виконаного ЕПЗ ($\times 500$).

Fig. 8. Microstructure of upper (a) and lower (b) areas of transition zone of the welded joints of aluminum 1201-T alloy with thickness of 25 mm made by the electron-beam welding ($\times 500$).

Відомо також [9], що термозміцнений алюмінієвий сплав системи Al–Cu–Mn з максимальним вмістом міді 7% (1201-Т), який під час зварювання повільно охолоджували, за кімнатної температури складається з розчину міді в алюмінії, часточок зміцнювача CuAl_2 , рівномірно розподілених на межі і по

об'єму зерен, та нерозчинних фаз, утворених легувальними домішками. Оскільки під час ЕПЗ швидкості охолодження металу достатньо великі, фаза CuAl_2 не встигає виділитись і кінцева мікроструктура є однорідним розчином міді в алюмінії з 7% Cu. Проте перенасичений розчин міді в алюмінії є нестійкий, тому навіть за кімнатної температури в ньому протікають процеси, що підвищують його міцність. На рис 8а чітко видно видовжені вкраплення зміцнювача CuAl_2 (білі плями) в розчині, форма яких зумовлена напрямленим тепловідводом, виконаний як потовщення зварюваних пластин у верхній частині ЗЗ.

ВИСНОВКИ

Запропоновано методику розрахунку ТП за стикового зварювання пластин швидкокорухомим концентрованим джерелом тепла з урахуванням нерівномірності розподілу енергії за товщиною під час ЕПЗ і за її алгоритмом побудовано термічні цикли, тривимірні зображення ізотерм та розподіли температур характерних ділянок ЗЗ алюмінієвого сплаву 1201-Т товщиною 10 та 25 mm. Встановлено, що зі збільшенням товщини пластин зменшуються розміри шва, зони сплавлення та термічного впливу у верхній частині ЗЗ. Це пояснено тим, що за інтенсивного тепловідводу менше розігрівається основний метал, швидше кристалізується розплав зварювальної ванни, унаслідок чого структура металу шва стає дрібнішою порівняно з ділянками, де немає тепловідведення.

РЕЗЮМЕ. Описана методика и отдельные экспериментальные результаты расчета зоны термического влияния стыковой электронно-лучевой сварки пластин переменной толщины с учетом неравномерности распределения энергии. Показано, что теплоотвод вследствие утолщения пластин изменяет размеры зоны термического влияния в верхней части сварного соединения. Установлено, что мгновенная скорость охлаждения изменяется с удалением от начала отсчета в результате изменения погонной энергии, что приводит к отличиям микроструктуры по толщине соединения.

SUMMARY. A method and separate experimental results of calculation of the thermal affected zone of the butt electron-beam welding of plates of variable thickness is described taking into account the unevenness of energy distribution. The influence of heat sink due to plates thickening which causes the change of sizes of the heat-affected zone in the upper part of the welded joint is shown. It is found from the built thermal cycles and metallographic researches, that the instantaneous speed of cooling changes with the removal from the beginning of counting out as a result of the linear energy change, thus causing the difference in microstructure across the weld thickness.

1. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машиностроение, 1951. – 296 с.
2. Кархин В. А. Тепловые основы сварки. – Л.: Изд-во Ленинград. гос. ин-та, 1990. – 100 с.
3. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Изд-во "ИНДПРОМ", 2001. – 815 с.
4. Василик А. В., Дрогомирецький Я. А., Криль Я. А. Теплові розрахунки при зварюванні. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 209 с.
5. Кодолов В. Д. К расчету термического цикла аргоно-дуговой сварки неплавящимся электродом листов из сплава АМг6 // Сварочное производство. – 1963. – № 4. – С. 14–17.
6. Артемьева Н. Н. К расчету температурного поля аргоно-дуговой сварки пластин из дуралюмина Д16 // Там же. – 1958. – № 5. – С. 16–19.
7. Стронский А. Е., Левин В. В. Расчет температурного поля в околошовной зоне при электроннолучевой сварке металлов большой толщины // Там же. – 1982. – № 5. – С. 3–4.
8. Кархин В. А., Филипенко А. Ю. Моделирование термических циклов в металле шва и ЗТВ при лучевых способах сварки пластин большой толщины // Там же. – 1996. – № 11. – С. 25–27.
9. Никифоров Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1972. – 204 с.

Одержано 07.08.2009