

УДК 621. 791: 620. 178. 311

РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ОКОЛІ ШВА ЗА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОВСТИХ ПЛАСТИН

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Д. В. РУДАВСЬКИЙ, І. М. ЛЯСОТА

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

Описано методику визначення тривісного напруженого стану за стикового зварювання швидкорухомим концентрованим джерелом тепла. Побудовано тривимірні розподіли компонент поля напружень для зварних з'єднань різних товщин з алюмінієвого сплаву 1201-Т, з'єднаних електронно-променевим зварюванням. Показано, що максимальними є залишкові поперечні σ_{xx} і осьові σ_{yy} напруження, які становлять 80...90% від границі міцності металу. Встановлено, що для пластин меншої товщини залишкові напруження більші за рахунок менших розмірів зони термодформаційного впливу.

Ключові слова: *залишкові напруження, зварне з'єднання, електронно-променеве зварювання, алюмінієвий сплав.*

Одним з найуживаніших і прецизійних способів з'єднання товстостінних елементів конструкцій (товщина більше 20 mm), які широко застосовують в авіа-космічній промисловості для виготовлення паливних баків, оболонок балістичних і крилатих ракет тощо, є електронно-променеве зварювання (ЕПЗ). Характерними ознаками термічного циклу за ЕПЗ є сконцентрованість джерела нагріву і висока швидкість процесу, що, в свою чергу, призводить до нерівномірності теплового потоку за перерізом з'єднання та структурної неоднорідності в зоні термічного впливу [1]. Ці чинники сприяють появі залишкових напружень (ЗН) і деформацій, які мають суттєвий вплив на зародження і розвиток ранніх стадій руйнування елементів конструкцій, що працюють у надскладних умовах статичних та знакозмінних динамічних навантажень, глибокого вакууму та криогенних температур.

Мета дослідження – розробити методику та розрахувати залишкові напруження у товстих пластинах за їх стикового ЕПЗ, враховуючи зміни розмірів зони пластичних деформацій за товщиною зварного з'єднання (ЗЗ).

Стан проблеми. У багатьох наближених методах [2, 3] припускають одновісність зварювальних напружень. До уваги беруть тільки ті, які діють у напрямку паралельному до осі шва, а інші ж вважають незначними. Ці методи ґрунтуються на: гіпотезі плоских перерізів; лінійності напруженого стану; схематизованій залежності границі текучості і відносної пружної деформації від температури; моделі ідеально пружно-пластичного тіла; незалежності теплофізичних властивостей матеріалу від температури; рівномірності розподілу температурного поля, деформацій та напружень за товщиною пластин. Вважають, що зона пластичних деформацій обмежена температурою, за якої метал втрачає пружні властивості, зокрема, для низьковуглецевих сталей 600°C, алюмінієвих сплавів 300°C. Ці підходи можна застосовувати у наближених інженерних розрахунках, однак для точнішого визначення ЗН вони непридатні, оскільки не враховують змін деформацій та напружень за перерізом ЗЗ.

Окремо необхідно виділити відомий наближений метод [4], у якому з певними припущеннями використано апарат теорії пластичності. Зокрема вважають, що кожен метал різко втрачає здатність чинити опір пластичному деформуванню у певному, досить вузькому для нього, інтервалі температур. І це відбувається за середньої температури T_k , тобто за $T \geq T_k$ границя текучості металу σ_T дорівнює нулю. Область, в якій метал нагрівався до $T = T_k$, розраховують від рухомого джерела тепла. Для низки металів визначили цю температуру експериментально (наприклад, для алюмінієвого сплаву АМг6 $T_k = 375^\circ\text{C}$). Також припустили, що слід розглядати утворення ЗН тільки на стадії охолодження, а деформацію під час нагрівання пластин до уваги не брати. Таким чином, запропоновано причиною виникнення ЗН і деформацій вважати лише температурне укорочення області, в якій $T \geq T_k$. Отже, цей метод не дає змоги розраховувати тривісний напружений стан.

Щоб оцінити кінетику залишкових напружень і деформацій, автори праць [5, 6] вперше використали числові методи розрахунку. Прийняли, що тіло пружно-пластично деформується під дією зварювального джерела тепла. Розроблено низку розрахункових алгоритмів, які широко апробовані під час побудови двовимірних та тривимірних розв'язків. В основу методу покладено гіпотезу плоскої деформації, що накладає певні обмеження на коло практичних задач.

Чисельно-елементний аналіз розподілу ЗН за ручного дугового зварювання тонких пластин з вуглецевої сталі наведено у праці [7]. Послідовно розв'язано теплову і механічну задачі, враховано зміну теплофізичних і механічних характеристик сталі залежно від температури. Аналогічну модель застосували, щоб визначити напружений стан за ЕПЗ тонких пластин з титанового сплаву ВТ20 [8]. Змодельовано часткове зняття ЗН за допомогою післязварювальної обробки шва розфокусованим електронним променем.

Описано [9] розрахунковий метод моделювання напруженого стану в зоні ЗЗ з урахуванням фазових перетворень за стикового лазерного зварювання пластин. У моделі визначення ЗН від термічного навантаження і структурних перетворень застосовано закон неізотермічного пластичного течіння з ізотропним зміцненням з урахуванням умови Губера–Мізеса, а також зміни сталих матеріалу залежно від його температури і структурного складу. Проте цей метод побудований виключно для ЗЗ легуваних сталей.

Поряд з аналітичними методами дослідження напруженого стану у ЗЗ широко використовують розрахункові, що ґрунтуються на попередніх експериментах. Зокрема, розповсюдженим підходом є введення в обчислення параметрів поля залишкових деформацій, що зводить задачу до визначення напружень, які відповідають заданим деформаціям. У літературі відома низка методик експериментально-аналітичного розрахунку ЗН, а саме методи: рівномірного усадження [4], фіктивної усадної сили [10], заданих об'ємів укорочення [11], умовних пластичних деформацій [12] та інші.

Методика визначення поля залишкових напружень за електронно-променевого зварювання товстих пластин. В основу розрахунку покладено аналітично-експериментальний метод [12]. Його суть полягає у тому, що розглядають нескінченний плоский шар завтовшки $2h$ (рис. 1) під дією пластичних деформацій e_{ij}^0 , зумовлених зварюванням.

При цьому поле e_{ij}^0 враховує також

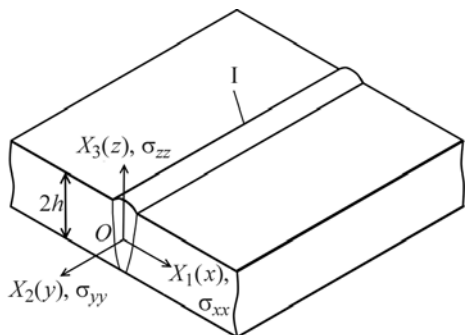


Рис. 1. Розрахункова схема: I – зварний шов.

Fig. 1. Calculation mode: I – welding joint.

деформації, спричинені різними структурними перетвореннями, які супроводжуються зміною об'єму металу. Шар віднесено до декартової системи координат $OX_1X_2X_3$ і введено безрозмірні координати: $x = X_1/h$, $y = X_2/h$, $z = X_3/h$.

Нехай шар знаходиться в умовах плоскої деформації ($e_{yy} = 0$, $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = 0$, σ_{ij} – компоненти тензора дотичних напружень) і його поверхні $z = \pm 1$ вільні від навантаження, а тензорне поле деформацій e_{ij}^0 ($i, j = x, y$) описується функціями [12]

$$e_{xx}^0 = e_{xx}^0(x, z), \quad e_{yy}^0 = e_{yy}^0(x, z), \quad e_{zz}^0 = e_{zz}^0(x, z), \quad e_{xz}^0 = e_{xz}^0(x, z), \quad e_{yz}^0 = e_{xy}^0 = 0. \quad (1)$$

На основі рівнянь рівноваги та сумісності деформацій і відомих співвідношень між компонентами тензора напружень і пружних деформацій, визначальні рівняння, що описують напружений стан такого шару, подано у вигляді [12]

$$\nabla^2 \sigma = \theta(x, z), \quad \nabla^2 \sigma_{zz} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \sigma, \quad (2)$$

$$\text{де} \quad \theta(x, z) = -\frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left(\frac{\partial^2 e_{zz}^0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e_{xx}^0}{\partial z^2} - 2 \frac{\partial^2 e_{xz}^0}{\partial x \cdot \partial z} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot e_{yy}^0 \right), \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2};$$

$\sigma = \sigma_{xx} + \sigma_{zz}$; σ_{ii} ($i = x, y, z$) – компоненти тензора нормальних напружень; E – модуль Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона.

Дотичні σ_{xz} , нормальні σ_{xx} та осьові σ_{yy} напруження визначають через розв'язувальні функції σ та σ_{zz} за формулами

$$2 \cdot \sigma_{xz} = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \sigma_{zz}(\eta, z)}{\partial z} \cdot \text{sgn}(x - \eta) d\eta, \quad (3)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma - \sigma_{zz}, \quad \sigma_{yy} = -E \cdot e_{yy}^0 + \mu \sigma. \quad (4)$$

Крайові умови для ненавантажених поверхонь шару $z = \pm 1$ з використанням рівнянь рівноваги такі:

$$\sigma_{zz} = 0, \quad \partial \sigma_{zz} / \partial z = 0. \quad (5)$$

Залишкові деформації e_{ij}^0 апроксимують функціями [12]

$$e_{yy}^0(x, z) = -k_1 \cdot \varepsilon_T \cdot \varphi_1(x) \cdot f_1(z), \quad e_{xx}^0(x, z) = -k_2 \cdot \varepsilon_T \cdot \varphi_2(x) \cdot f_2(z), \\ e_{xz}^0(x, z) = -k_0 \cdot \varepsilon_T \cdot \varphi_0(x) \cdot f_0(z), \quad (6)$$

$$\text{де} \quad \varphi_j(x) = 1 + a_j \cdot \frac{x^2}{x_{0j}^2} - (3 + 2 \cdot a_j) \cdot \frac{x^4}{x_{0j}^4} + (2 + a_j) \cdot \frac{x^6}{x_{0j}^6}, \quad (7)$$

$$\varphi_0(x) = \frac{x}{x_0} + a_0 \cdot \frac{x^3}{x_0^3} - (3 + 2 \cdot a_0) \cdot \frac{x^5}{x_0^5} + (2 + a_0) \cdot \frac{x^7}{x_0^7}, \quad (8)$$

$$f_j(z) = 1 - m_j(1 - z)^2, \quad j = 0, 1, 2, \quad (9)$$

$\varepsilon_T = \sigma_T/E$; σ_T – границя текучості матеріалу; $2x_{0j}$ – ширина зони пластичних деформацій; k_j, a_j, m_j – числові параметри.

Застосувавши до поданих вище рівнянь інтегральне перетворення Фур'є за координатою x , отримали їх розв'язки [13].

За такого методу визначення ЗН як додаткову експериментальну інформацію використовують поле залишкових деформацій e_{ij}^0 , яке вимірюють на поверхнях пластин безпосередньо під час зварювання. Для ЗЗ, які виконані заздалегідь або технологія їх виготовлення не дозволяє виміряти компоненти деформації e_{ij}^0

під час накладання шва (наприклад ЕПЗ), такий підхід не можна прямо застосувати. Тоді необхідно розв'язати так звану “обернену” задачу.

Отже, враховуючи вищенаведене та узагальнюючи відомі літературні дані, алгоритм розрахунку ЗН за електронно-променевого зварювання матиме таку послідовність:

1. Вимірюємо відомими методами неруйнівного контролю (ультразвуковим, магнетопружним, поляризаційно-оптичним, променевої спеклінтерферометрії тощо) компоненти поля залишкових напружень σ_{ij} на одній з поверхонь ЗЗ.

2. Визначаємо експериментально розміри $2x_{0j}$ та форму зони пластичних деформацій за перерізом з'єднання.

3. Апроксимуючи розподіли компонент σ_{ij} , отриманих у п. 1 та маючи дані п. 2, підбираємо числові параметри k_j , a_j , m_j так, щоб встановлені експериментально межі поля ЗН співпали з розрахунковими.

4. Одержавши параметри поля пластичних деформацій k_j , a_j , m_j , розраховуємо тривісний розподіл залишкових напружень за перерізом ЗЗ, використовуючи залежності (6)–(9).

В основу розрахунку розмірів зони пластичних деформацій $2x_{0j}$ покладено метод [3], де для їх встановлення розглядають повздовжні деформації в поперечному перерізі на стадії нагріву і після повного охолодження. Вважають [3], що їх слід визначати у перерізі, який під дією термічного циклу зварювання нагрівався до певних температур: для низьковуглецевих сталей 600°C ; алюмінієвих сплавів 300°C . Оскільки цей підхід не враховує зміну розмірів $2x_{0j}$ за товщиною ЗЗ, пропонуємо для визначення температурного поля використати методику [1], яка дає змогу отримати просторове зображення ізотермічних поверхонь з урахуванням нерівномірності розподілу потужності джерела тепла за перерізом ЗЗ.

Оцінка поля ЗН за стикового електронно-променевого зварювання товстих пластин з алюмінієвого сплаву 1201-Т. Для прикладу розрахуємо залишковий напружений стан для пластин товщиною $\delta = 20$ mm та 25 mm з алюмінієвого сплаву 1201-Т, з'єднаних наскрізним ЕПЗ. Режими зварювання наведено в табл. 1. Теплофізичні та механічні характеристики сплаву такі: коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 142$ W/(m·grad); об'ємна теплоємність $C_v = 2,72 \cdot 10^6$ G/(m³·grad); коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 23,8 \cdot 10^6$ 1/grad; умовна границя текучості $\sigma_{0,2} = 300$ МПа; границя міцності $\sigma_B = 420$ МПа; $E = 7,2 \cdot 10^4$ МПа; $\mu = 0,33$. Ефективний коефіцієнт корисної дії джерела тепла $\eta = 0,89$.

Таблиця 1. Режим ЕПЗ пластин з алюмінієвого сплаву 1201-Т

Товщина пластин δ , mm	Струм променя I , mA	Напруга пришивдення U , kV	Швидкість зварювання v , m/h
20	140	55	70
25	210	55	50

Розподіли компонент поля залишкових напружень σ_{ij} на поверхні ЗЗ визначали методом лазерної спеклінтерферометрії, оскільки він забезпечує високу точність та можливість вимірювань у немагнетних металах. Розміри зони пластичних деформацій $2x_{0j}$ розраховували за описаною вище методикою. Форми зварного шва, зони термічного впливу та ділянки пластичного деформування для пластин товщиною $\delta = 25$ mm проілюстровано на рис. 2. Експериментальні вимірювання показали, що вказані пластини у стані поставки містять залишкові напруження σ_{xx} і σ_{yy} в межах 30...50 МПа, які викликані пластичним деформуванням від вальцювання під час виготовлення листів. Оскільки напруження незначні, то їх до уваги не брали.

Для розв'язків оберненої задачі експериментально підібрали числові парамет-

ри поля пластичних деформацій у залежностях (6)–(9) так, щоб реально вимірний розподіл ЗН співпав з розрахунковим (рис. 3). Значення цих коефіцієнтів наведено у табл. 2. За отриманими результатами обчислили розподіли за товщиною компонент поля залишкових напружень вищезгаданих ЗЗ, які показано на рис. 4 і 5.

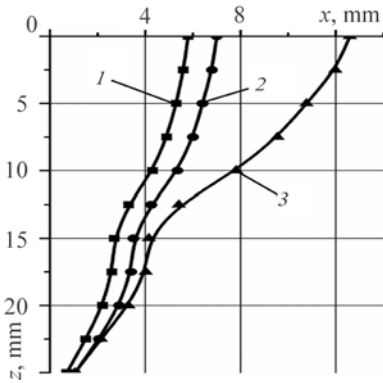


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Криві, що проходять по межі зварного шва (1), зони термічного впливу (2) та ділянки пластичного деформування (3) у площині xOz для пластин завтовшки 25 mm.

Fig. 2. Curves describing boundaries of the welding joint (1), heat affected zone (2) and plastic strain zone (3) in xOz plane for plates of thickness 25 mm.

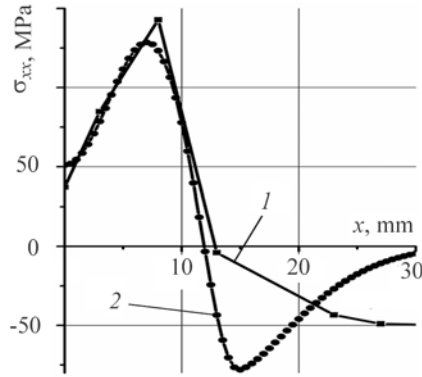


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Зображення розподілу ЗН σ_{xx} зі сторони кореня шва зварного з'єднання товщиною 20 mm: 1 – визначено експериментально; 2 – розраховано аналітично.

Fig. 3. Residual stress σ_{xx} distribution from the side of the weld joint root of 20 mm thickness: 1 – determined experimentally; 2 – analytically.

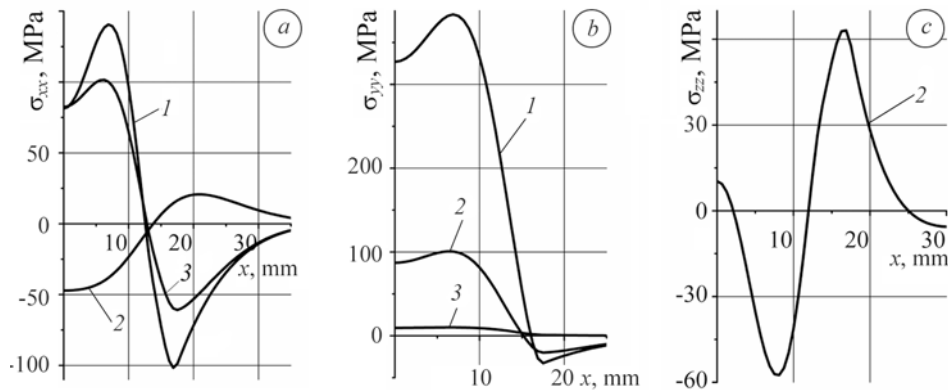
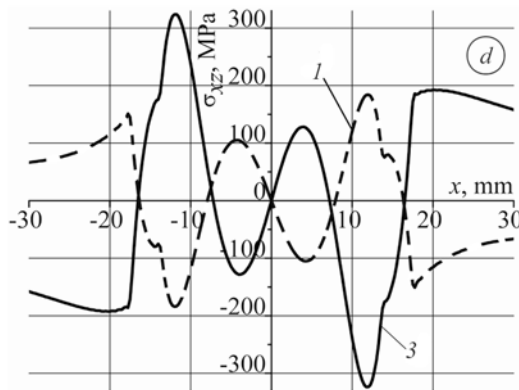


Рис. 4. Розподіли залишкових поперечних σ_{xx} (a), осьових σ_{yy} (b), нормальних σ_{zz} (c) та дотичних σ_{xz} (d) напружень на лицевій (1) і серединній (2) поверхнях ЗЗ та зі сторони кореня шва (3) за ЕПЗ пластин товщиною 25 mm.

Fig. 4. Transversal σ_{xx} (a), axial σ_{yy} (b), normal σ_{zz} (c) and tangential σ_{xz} (d) residual stresses distribution at the face (1) and central (2) parts of welding joint and from the side of joint root (3) for 25 mm thick plates welded by electron-beam method.



Таблиця 2. Значення коефіцієнтів кореляції для залежностей (6)–(9)

Товщина пластин δ , mm	Коефіцієнт								
	k_1	k_2	k_0	a_1	a_2	a_0	m_1	m_2	m_0
20	1	0,35	0,01	3,1	2,9	0,1	0,17	0,17	0,1
25	1	0,35	0,01	1,7	1,3	0,1	0,2	0,2	0,1

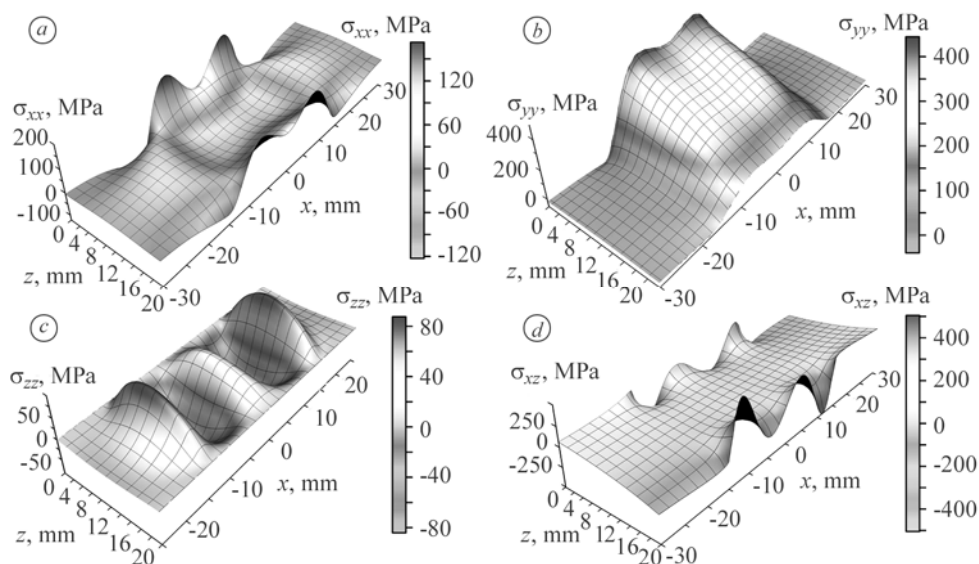


Рис. 5. Тривимірні розподіли компонент поля залишкових напружень: σ_{xx} (a), σ_{yy} (b), σ_{zz} (c) та σ_{xz} (d) у 33 сплаву 1201-Т товщиною 20 mm.

Fig. 5. Three-dimensional distribution of residual stress field components: σ_{xx} (a), σ_{yy} (b), σ_{zz} (c) та σ_{xz} (d) for welding joint of 20 mm thickness for 1201-T alloy.

Аналіз отриманих результатів (рис. 5) показує, що найнебезпечніші з точки зору міцності конструкції є поперечні σ_{xx} і осьові σ_{yy} напруження, які сягають свого максимального значення 80...90% від границі міцності металу з ліцевої поверхні зварного шва у зоні термічного впливу і плавно спадають з наближенням до кореня з'єднання. Такий високий рівень ЗН і значні розміри зони пластичних деформацій у верхній частині ЗЗ (див. рис. 2) пояснюють природою і фізичними властивостями алюмінієвих сплавів, зокрема коефіцієнтом температурного розширення α та умовною границею текучості $\sigma_{0,2}$, які є основними чинниками, що впливають на залишковий напружений стан під час зварювання. Нормальні ЗН σ_{zz} найбільших значень досягають на серединній поверхні ЗЗ, а дотичні σ_{xz} – на нижній. Порівнюючи результати для пластин різної товщини, встановлено, що за меншої товщини залишкові напруження більші за рахунок менших розмірів шва і зони термодформатійного впливу.

ВИСНОВКИ

Запропоновано методику розрахунку тривісного поля залишкових напружень за стикового зварювання товстих пластин швидкорухомим концентрованим джерелом тепла з урахуванням нерівномірності розподілу енергії за перерізом ЗЗ. Визначено розміри зони пластичних деформацій та побудовано тривимірні розподіли компонент поля залишкових напружень для пластин різної товщини з алюмінієвого сплаву 1201-Т, з'єднаних наскрізним ЕПЗ. Встановлено, що най-

більші поперечні σ_{xx} і осьові σ_{yy} напруження, максимальні значення яких зосереджені в зоні термічного впливу на зовнішній поверхні зварних пластин. Це, мабуть, зумовлено значною хімічною, структурною неоднорідностями і скупченням різноманітних дефектів, які під дією цих напружень можуть розвиватись і досягати закритичної стадії.

РЕЗЮМЕ. Описана методика определения остаточного напряженного состояния во время стыковой сварки концентрированным источником тепла. Построены трехмерные распределения компонент поля напряжений для сварных соединений различных толщин из алюминиевого сплава 1201-Т, соединенных электронно-лучевой сваркой. Показано, что максимальными являются остаточные поперечные σ_{xx} и осевые σ_{yy} напряжения, которые составляют 80...90% от предела прочности металла. Установлено, что для пластин меньшей толщины остаточные напряжения являются большими за счет меньших размеров зоны термомодеформационного влияния.

SUMMARY. The method of the residual stress state determination for butt welding by high-speed concentrated heat source was described. Three-dimensional distributions of stress field component for welds of various thickness of 1201-T aluminum alloy welded by electron-beam method were build. It was shown that transversal σ_{xx} and axial σ_{yy} stresses were maximal and constituted 80...90% of metal ultimate strength σ_s . It was determine that the less plate thickness led to the higher level of residual stresses due to the less size of thermo-deformation affect zone.

1. Скальський В. Р., Лясота І. М. Оцінка зони термічного впливу за електронно-променевого зварювання пластин // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 1. – С. 103–109.
(Skal's'kyi V. R. and Lyasota I. M. Estimation of the heat-affected zone for the electron-beam welding of plates // Materials Science. – 2010. – № 1. – P. 115–123.)
2. Трочук І. П. Внутренние усилия и деформации при сварке. – М.: Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1964. – 248 с.
3. Николаев Г. А. Сварные конструкции. – М.: Машгиз, 1962. – 552 с.
4. Тальтов Г. Б. Сварочные деформации и напряжения. – Л.: Машиностроение, 1974. – 278 с.
5. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – К.: Наук. думка, 1976. – 320 с.
6. Махненко В. И., Егорова Л. А. Расчетные методы оценки напряжений и деформаций в зоне продольных сварных швов цилиндрических оболочек // Автоматическая сварка. – 1980. – № 3. – С. 3–7.
7. Stamenković D. and Vasović I. Finite Element Analysis of Residual Stress in Butt Welding Two // Scientific Technical Review. – 2009. – LIX, № 1. – P. 57–60.
8. Finite Element Numerical Simulation of Residual Stresses on Electron Beam Welded BT20 Plates / Lixing Huo, Furong Chen, Yufeng Zhang et al. // J. of Materials Sciences & Technology. – 2004. – 20, № 1. – P. 117–120.
9. Бокота А., Пекарская Л. Численное исследование напряженного состояния сварных соединений выполненных лазерной сваркой // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. трудов междунар. конф. (пос. Качивели, Крым, 16–20 сент. 2002 г.) / Под ред. В. И. Махненко. – К., 2002. – С. 131–135.
10. Винокуров В. А., Григорянц А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
11. Окерблом И. О. Сварочные напряжения и деформации. – М.: Машиностроение, 1948. – 144 с.
12. Осадчук В., Цимбалюк Л. Особливості розподілу залишкових напружень у шарі з прямолінійним швом, звареним концентрованим джерелом нагріву // Машинознавство. – 2003. – № 3. – С. 13–17.
13. Осадчук В., Банахевич Ю., Цимбалюк Л. Вплив ширини зони пластичних деформацій на розподіл тривісних залишкових напружень у плиті з багатшаровим прямолінійним зварним швом // Там же. – 2008. – № 2. – С. 13–17.

Одержано 21.11.2011