

**УДК 621.326**

**Богдан Царик; Олег Махненко, д.т.н.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

### **РОЗРАХУНКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЄМНОСТЕЙ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ**

Анотація. Представлена розрахункова модель прогнозування залишкових деформацій для великогабаритних конструкцій з великою кількістю зварних з'єднань. Для циліндричної ємності з алюмінієвого сплаву з великою кількістю зварних швів була визначена методом термопластичності функція усадки при зварюванні тертям з перемішуванням, і за допомогою наближеного методу функції усадки розраховані загальні залишкові деформації.

Ключові слова: зварні ємності, алюмінієвий сплав, зварювання тертям з перемішуванням, залишкові деформації, математичне моделювання.

**Bohdan Tsaryk; Oleh Makhnenko, Ph.D.**

### **CALCULATIONAL PREDICTION OF RESIDUAL DISTORTIONS AT WELDING OF LARGE-SCALE ALUMINUM ALLOY TANKS**

Abstract. A computational model for predicting residual distortions of large-scale structures with a large number of welded joints was developed. For cylindrical tank made of aluminum alloy with a large number of welds the inherent strain function for friction stir welding joint was determined by the thermoplasticity analysis, and the residual distortions were calculated by the inherent strain method.

Keywords: welded tanks, aluminum alloy, friction stir welding, residual distortions, mathematical modeling.

Технологія зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) широко використовується для виконання з'єднань великогабаритних конструкцій, таких як паливні баки для аерокосмічної техніки, корпуси для транспортного машинобудування та ін. Для прогнозування точності, міцності та довговічності зварних конструкцій, виконаних ЗТП, актуальним завданням є розрахункове визначення залишкових напружень та деформацій. Особливо складною проблемою є прогнозування загальних деформацій великогабаритних конструкцій з великою кількістю зварних з'єднань.

#### **Методологія розрахункового визначення зварювальних деформацій**

Для вирішення задачі прогнозування деформацій великогабаритних циліндричних ємностей з алюмінієвого сплаву з великою кількістю зварних швів (Рис.1.) застосовано методологію моделювання зварювальних напружень і деформацій на основі комбінованого використання загального методу термопластичності [1] і наближеного методу функції усадки [2]. За допомогою методу термопластичності моделюється тимчасові і залишкові напруження і деформації для окремих зварних з'єднань. Відомо, що залишкові зварні напруження і пластичні деформації утворюються в обмеженій області в зоні зварного з'єднання. Тому розподілення залишкових напружень і параметрів функції усадки може бути отримано на спрощених моделях зварного з'єднання обмеженого розміру, що потребує значно менших комп'ютерних ресурсів і часу на розрахунок.

Стосовно великогабаритних циліндричних ємностей з повздовжніми і кільцевими стиковими з'єднаннями доцільно розглядати два типи спрощених моделей. Для визначення локальних залишкових деформацій (параметрів функції усадки) в зонах

повздовжніх з'єднань можна використовувати модель стикового з'єднання плоских елементів обмеженого розміру (Рис.2а). В зоні кільцевих з'єднань для визначення залишкових напружень і деформацій (параметрів функції усадки) можна використовувати спрощену модель в двовимірній постановці стикового кільцевого з'єднання реального розміру, але з припущенням швидкорухомого джерела зварювального нагріву і гіпотези «плоскої деформації» (Рис.2б).

Потім, з використанням трьохмірної моделі циліндричної ємності реального розміру за допомогою наближеного методу функції усадки в рамках пружної постановки задачі моделюються загальні деформації великогабаритної зварної конструкції від всіх зварних швів.



Рис.1. Схема деформацій циліндричної ємності з великою кількістю повздовжніх і кільцевих зварних з'єднань.

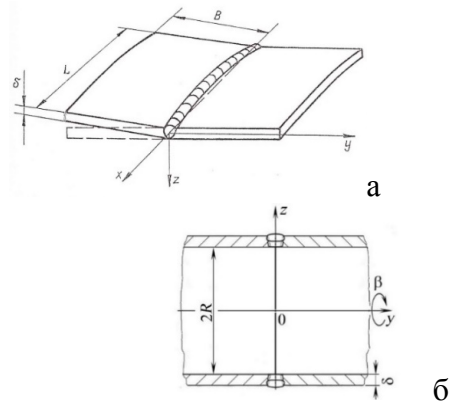


Рис.2. Визначення параметрів функції усадки: а) 3D модель стикового зварного з'єднання пластин обмеженого розміру; б) 2D модель кільцевого зварного з'єднання

### Узагальнене представлення функції усадки як тензорної функції

Представимо функцію усадки як тензор пластичних деформацій

$$\Pi_{ij} = \begin{vmatrix} \Pi_{xx} & \Pi_{xy} & \Pi_{xz} \\ \Pi_{yx} & \Pi_{yy} & \Pi_{yz} \\ \Pi_{zx} & \Pi_{zy} & \Pi_{zz} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx}^p & \varepsilon_{xy}^p & \varepsilon_{xz}^p \\ \varepsilon_{yx}^p & \varepsilon_{yy}^p & \varepsilon_{yz}^p \\ \varepsilon_{zx}^p & \varepsilon_{zy}^p & \varepsilon_{zz}^p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx}^p & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy}^p & 0 \\ 0 & 0 & -(\varepsilon_{xx}^p + \varepsilon_{yy}^p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Pi_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \Pi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & -(\Pi_{xx} + \Pi_{yy}) \end{vmatrix}$$

$\varepsilon_{xy}^p = \varepsilon_{yx}^p = \varepsilon_{xz}^p = \varepsilon_{zx}^p = \varepsilon_{zy}^p = \varepsilon_{yz}^p = 0$ , оскільки вісь  $X$  і  $Y$  є головними осями для повздовжнього і поперечного напрямлення зварних з'єднань,  $\varepsilon_{zz}^p = -(\varepsilon_{xx}^p + \varepsilon_{yy}^p)$  з умови збереження об'єму. Якщо вздовж зварного з'єднання функція усадки постійна, тоді  $\Pi_{xx} = \varepsilon_{xx}^p(y, z)$ ,  $\Pi_{yy} = \varepsilon_{yy}^p(y, z)$ .

### Постановка задачі визначення деформації на основі тензорної функції усадки

Тензор повних деформацій  $\varepsilon_{ij}$  в зварному елементі буде визначатися сумою тензора пружних деформацій  $\varepsilon_{ij}^e$  і тензора функції усадки  $\Pi_{ij}$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \Pi_{ij}, \quad (i, j = x, y, z).$$

Компоненти тензора  $\varepsilon_{ij}$  виражаються в кожній точці  $(x, y, z)$  трьома компонентами вектору переміщень  $U_i$ , а також пов'язані один з одним рівняннями сумісності деформацій. На граничних поверхнях величини переміщень  $U_i$  визначаються граничними умовами. Компоненти тензора  $\varepsilon_{ij}$  в рамках пружної постановки задачі

пов'язані з тензором напружень  $\sigma_{ij}$  законом Гука. Компоненти тензора напружень пов'язані один з одним рівняннями рівноваги. Вказані співвідношення і умови визначають загальну постановку задачі.

### Визначення функції усадки для зварювання тертям з перемішуванням

Для визначення функції усадки були використані методи математичного моделювання температурних розподілів і напружено-деформованого стану стикового з'єднання пластин при зварювальному нагріві. Особливістю розробленої моделі джерела нагріву при ЗТП являється тепловиділення за рахунок тертя інструменту відносно матеріалу з'єднання [1]. Інструмент обертається навколо вертикальної осі з певною кутовою швидкістю  $\omega$ , (об/с) і притискається до пластин з осьовим зусиллям  $P_n$ , (Па), що викликає на поверхні контакту інструменту тепловий потік в матеріал з'єднання

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot r, \quad (Вт/м^2); \quad Q = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot \pi \cdot \iint_S r dS,$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя,  $Q$  - потужність тепловиділення (Вт),  $S$  - площа відповідних поверхонь контакту,  $Q_1 = 2\pi/3 \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot (R_2^3 - R_1^3)$  на плечі ( $z=\delta$ ,  $R_1 > r > R_2$ ),  $Q_2 = 2\pi \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^2 \cdot h$  на бічній поверхні штиря ( $r=R_1$ ,  $(\delta-h > z > \delta)$ ),  $Q_3 = 2\pi/3 \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^3$  на нижній торцевій поверхні штиря ( $z=\delta-h$ ,  $0 > r > R_1$ ). Де  $\delta$  - товщина зварюваних пластин, (м),  $h$  - довжина штиря, (м). Потужність об'ємного тепловиділення  $W(x,y,z,t)$ , (Вт/м<sup>3</sup>) складається з тепловиділення в об'ємі  $V_1$  на верхній поверхні пластин з'єднання під плечем інструменту і в об'ємі штиря  $V_2$  ( $dz$  - розмір скінченного елемента):

$$W(x, y, z, t) = W_1 + W_2 = \frac{Q_1}{V_1} + \frac{Q_2 + Q_3}{V_2} = \frac{2\mu P_n \omega (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2)}{3(R_2 + R_1) dz} + \frac{2\mu P_n \omega}{\delta - h} \left( h + \frac{R_1}{3} \right).$$

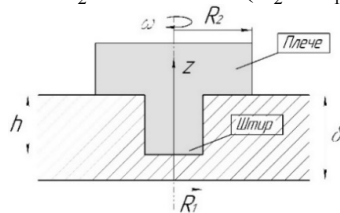


Рис. 3 Схема робочого інструменту при ЗТП

Модель термопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання передбачає, що тензор загальних деформацій є сумою пружних і пластичних деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad \text{де } \varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} (K\sigma + \varphi) \quad (i, j = x, y, z)$$

де  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера,  $\sigma$  - кульовий тензор,  $G$  - модуль зсуву,  $K$  - модуль об'ємної деформації,  $E$  - модуль Юнга,  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона,  $\varphi = \alpha(T - T_0)$ , де  $\alpha$  - коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу. Пластичні деформації пов'язані з напруженнями рівнянням теорії пластичної неізотермічної течії (умовою Мізеса).

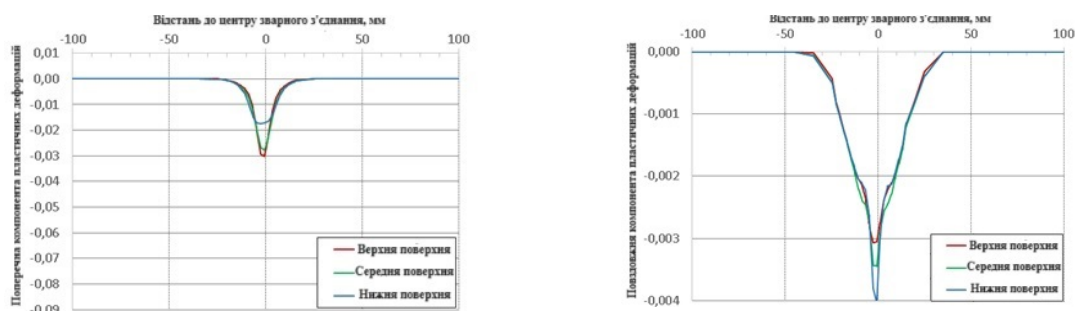


Рис.4 Результати розрахунку розподілу поперечних і поздовжніх пластичних деформацій для стикових зварних з'єднань у моделі FSW пластини (300x300 мм,  $\delta=10$  мм)

### Результати моделювання зварювальних деформацій

На Рис.5 представлено варіант довгої циліндричної оболонки, яка містить 6 поздовжніх і 5 кільцевих зварних з'єднань.

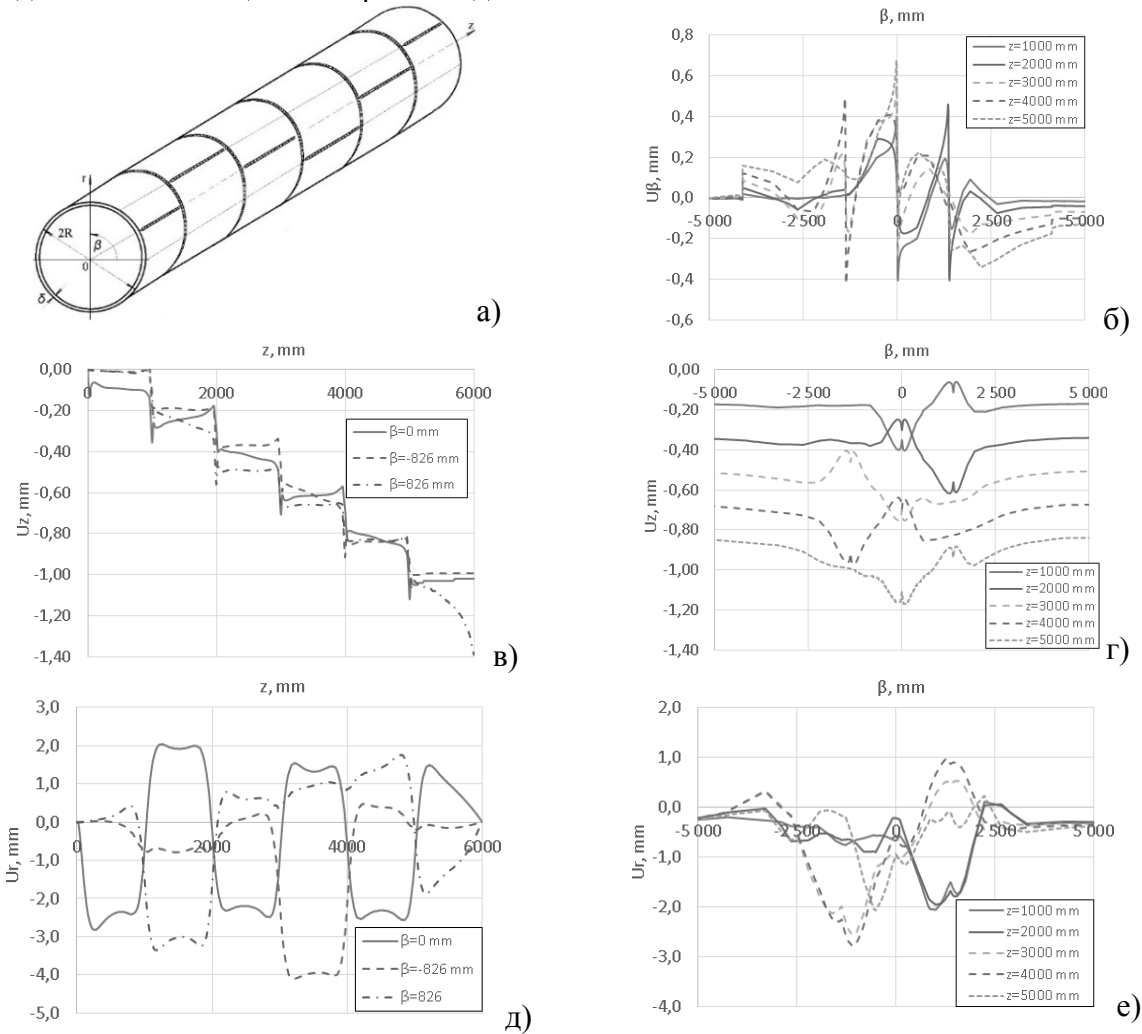


Рис.5. Зварювальні деформації циліндричної оболонки ( $D=3200$  мм,  $L=6000$  мм,  $\delta=10$  мм)

**Висновки.** Розроблено математичну модель і розрахунковий алгоритм для розрахункового визначення зварювальних деформацій великогабаритних циліндричних оболонок з великою кількістю кільцевих і поздовжніх зварних з'єднань. Параметри функції усадки зварних з'єднань - це пластичні деформації в осьовому  $\Pi_{zz}$  та окружному  $\Pi_{\beta\beta}$  напрямках. Задачу вирішують у загальній тривимірній постановці в межах пружного розв'язання, що дає змогу з достатньою інженерною точністю оперативно прогнозувати деформації великогабаритних циліндричних ємностей зі зварними з'єднаннями різного напрямку та розташування.

#### Перелік посилань

1. B.R. Tsaryk, O.F. Muzhychenko, O.V. Makhnenko Mathematical model of determination of residual stresses and strains in friction stir welding of aluminium alloy. The Paton Welding Journal – 2022. - #9. – P.33-40.
2. Махненко О. В., Мужиченко А. Ф. Математическое моделирование тепловой правки цилиндрических оболочек и валов с общими деформациями искривления продольной оси. Автомат. сварка. – 2007. – № 9. – С. 23–28.