УДК 539.3

ЗАДАЧА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗВАРНИХ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЦИЛІНДРО-КОНІЧНІЙ МЕТАЛЕВІЙ ОБОЛОНЦІ ОБЕРТАННЯ

М. Николишин

Професор, д-р техн. наук

Л. Базилевич

Канд. фіз.-мат наук

Інститут прикладних
проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України,
м. Львів

Розв'язано некоректну задачу ідентифікації залишкових напружень у металевій циліндро-конічній оболонці обертання з використанням частини експериментальних даних, отриманих електромагнітним методом. Запропоновано ефективну числово-аналітичну методику, яка базується на розвязанні оберненої умовно коректної задачі з використанням сплайн-апроксимацій.

неруйнівний контроль, залишкові напруження, обернена умовно коректна задача, оболонка обертання, сплайн-апроксимація

Неруйнівні методи контролю над рівнем залишкових напружень мають важливе значення для оцінювання міцності та надійності різноманітних елементів конструкцій. Експериментальні дані, отримані неруйнівними методами, не дають повної інформації про напружено-деформований стан в околі зварних з'єднань. Визначення повної картини залишкових технологічних напружень в елементах оболонкових конструкцій ґрунтується на розв'язанні обернених умовно коректних задач теорії оболонок з власними напруженнями з використанням частини значень напружень чи їхніх інтегральних характеристик, отриманих на основі експерименту.

Теоретико-експериментальний метод визначення залишкових напружень в околі зварних з'єднань запропоновано та розроблено Я. С. Підстригачем, В. А. Осадчуком та розвинуто в працях їхніх учнів. У працях [2, 5 — 6] розв'язано задачі для оболонок, для яких розв'язки ключових рівнянь можна одержати аналітично. Подальший розвиток методу було зроблено в працях [7 — 10] для зварних оболонкових конструкцій складної конфігурації з різними фізичними та геометричними параметрами, для яких поле залишкових деформацій можна описати кульовим тензором. При цьому використано сплайнові зображення для невідомих розв'язків ключових рівнянь та полів залишкових деформацій. Тут цю методику розвинуто на конструкції, для яких поле залишкових деформацій описується некульовим тензором.

Постановка задачі. Основні співвідношення теорії оболонок з залишковими деформаціями одержують, використавши зображення компонент тензора малої деформації $\{e_{ij}\}$ у вигляді суми: $e_{ij} = e_{ij}^{l} + e_{ij}^{0}$, де e_{ij} — компоненти тензора повної деформації; e_{ij}^{l} — компоненти тензора пружної деформації; e_{ij}^{0} — компоненти тензора умовних пластичних деформацій та деформацій, спричинених різними структурними перетвореннями, вони сукупно зумовлюють залишкові напруження. Створити строгу математичну модель такої задачі не є можливо. У конкретних зварних конструкціях певними неруйнівними методами можна отримати дані, які дозволяють визначити частину компонент тензора залишкових напружень σ_{ij} чи їхні інтегральні характеристики. Враховуючи це, можна отримати додатково рівняння між експериментально визначеними і теоретично представленими характеристиками полів напружень через розв'язки ключових рівнянь

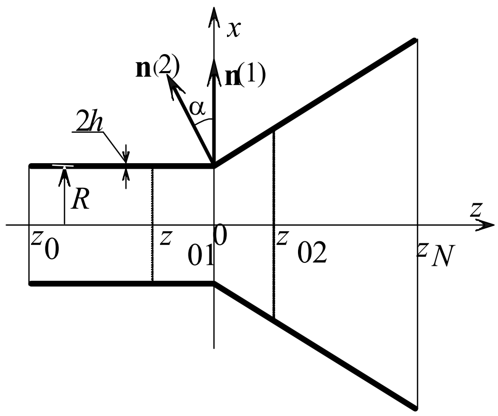

Рис. 1

теорії оболонок, які містять невідомі компоненти інтегральних характеристик поля деформацій e_{ij}^0. Мінімізуючи функціонал нев'язок, отримуємо розв'язок задачі, тобто, повну картину напружено-деформованого стану звареної з двох частин оболонки та ширину зони локалізації зварних залишкових деформацій в околі шва.

Розглянемо оболонку обертання, утворену обертанням плоскої кривої навколо прямолінійної осі. Вибираємо декартову систему координат, де вісь z є віссю обертання, а рівняння меридіана, що лежить у певній меридіанній площині, записується рівнянням

$$r = r(z) \tag{1}$$

Тоді коефіцієнти першої квадратної форми поверхні та її кривини запишуться так [1]:

$$A_1 = \sqrt{1+(r')^2},\, A_2 = r\,,$$

$$k_1 = \frac{-r''}{\left[1+(r')^2\right]^{3/2}},\, k_2 = \frac{1}{r\left(1+(r')^2\right)^{1/2}}\,. \tag{2}$$

Використовуючи основні співвідношення теорії оболонок з власними напруженнями, наведені в монографії [2], отримаємо ключові рівняння для осесиметричної задачі для оболонкової конструкції звареної з циліндричної та конічної частини.

Рівняння меридіана такої складеної оболонки матиме вигляд

$$r(z) = \begin{cases} R, & z \in [z_0, 0] \\ az + R & z \in [0, z_N], \end{cases} \tag{3}$$

а коефіцієнти першої квадратної форми та кривини запишемо так:

$$A_1 = \begin{cases} 1, & z \in [z_0, 0] \\ \left(1+a^2\right)^{1/2}, & z \in [0, z_N]; \end{cases}$$

$$A_2 = \begin{cases} R, & z \in [z_0, 0] \\ az + R & z \in [0, z_N]; \end{cases} \tag{4}$$

$$k_1 = 0\,,\quad k_2 = \begin{cases} 1/R, & z \in [z_0, 0] \\ 1\Big/\left(\left(1+a\right)^{1/2}\ \left(az+R\right)\right), & z \in [0, z_N]. \end{cases} \tag{5}$$

Тоді ключові рівняння отримають вигляд:

$$\begin{cases} \dfrac{d^2 v}{dz^2} + \dfrac{D}{R}\theta = D_0 \dfrac{d\varepsilon_{22}^0}{dz} \\ \dfrac{d^2 v}{dz^2} + \dfrac{a}{az+R}\dfrac{dv}{dz} - \left(\dfrac{a}{az+R}\right)^2 v + \dfrac{D^0\left(1+a^2\right)^{1/2}}{az+R}\theta = \\ D_0 \dfrac{d\varepsilon_{22}^0}{dz} + \dfrac{aD_0}{az+R}\left(\varepsilon_{22}^0 - \varepsilon_{11}^0\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{d^2\theta}{dz^2} - \dfrac{1}{RD_1}v = -\dfrac{d\kappa_{11}^0}{dz} - \nu\dfrac{d\kappa_{22}^0}{dz} \\ \dfrac{d^2\theta}{dz^2} + \dfrac{a}{az+R}\dfrac{d\theta}{dz} - \left(\dfrac{a}{az+R}\right)^2\theta - \dfrac{\left(1+a^2\right)^{\frac{1}{2}}}{D_1\left(az+R\right)}v = \\ -\dfrac{d\kappa_{11}^0}{dz} - \nu\dfrac{d\kappa_{22}^0}{dz} + \dfrac{(1-\nu)a}{2\left(az+R\right)}\left(\kappa_{22}^0 - \kappa_{11}^0\right). \end{cases} \tag{6}$$

Ключові функції і невідомі інтегральні характеристики поля залишкових деформацій подамо у вигляді кубічних сплайнів. Найбільш ефективним є зображення у вигляді лінійної комбінації базових нормалізованих сплайнів, які є додатними і фінітними функціями на своїх інтервалах-носіях [3]:

$$v(z) = S_3^v(z) = \sum_{i=-2}^{2} b_i^v B_3^i(z)\,,$$

$$\theta(z) = S_3^\theta(z) = \sum_{i=-2}^{2} b_i^\theta B_3^i(z)\,, \tag{7}$$

$$e_{ij}^o(z,\gamma) = \begin{cases} S_{3ij}^{(0)}(z) + \gamma S_{3ij}^{(1)}(z) + \gamma^2 S_{3ij}^{(2)}(z), z_{01} \le z \le z_{02}; \\ 0, \qquad z \prec z_{01}, z \succ z_{02}, \end{cases}$$

де $S_{3ij}^{(l)}(z) = \sum\limits_{k=-2}^{2} b_{kij}^{(l)} B_{3ij}^k(z), l = 1,2,3 \quad i,j = 1,2$,

а $b_k^v, b_k^\theta, b_{kij}^{(l)}$ — невідомі коефіцієнти.

Експеримент та його опрацювання. Експериментальні дані отримано використовуючи електромагнітний метод [5 — 6]. Отримано усереднену в приповерхневому шарі різницю головних напружень σ_{+h}^E. Усереднення здійснено за площею поверхні контакту електромагнітного перетворювача з поверхнею оболонки. Тоді теоретично одержаний вираз σ_{+h}^T матиме вигляд

$$\sigma^T_{+h}(z, b^v_k, b^\theta_k, b^{(l)}_{kij}) =$$

$$\frac{2}{\pi r_0^2} \int\limits_{z_n - r_0}^{z_n + r_0} \left[\sigma^+_{22}(z) - \sigma^+_{11}(z) \right] \sqrt{r_0^2 - (z - z_n)^2}\, dz\,, \quad (8)$$

де R_0 — радіус круга, який є поверхнею контакту; $r_0 = R_0 / R$; z_n — координати центрів круга вздовж труби під час вимірювань, коефіцієнти $b^v_k, b^\theta_k, b^{(l)}_{kij}$ — невідомі коефіцієнти зображень (7).

Оскільки маємо справу зі значеннями, отриманими з певною похибкою, яка в окремих точках може бути досить великою, то при апроксимації таких даних інтерполяційним сплайном можемо отримати небажані виражені осциляції. Тому вважаємо доцільним використати апроксимацію згладжувальним сплайном [3]. Отримаємо експериментальну криву $S_3 \sigma^E_{+h}(z)$.

Вважаємо, що на лінії зварного шва $z = 0$ складеної оболонки виконуються кінематичні та статичні умови ідеального механічного спряження, які для осесиметричної задачі запишемо так:

$$u_1 = u_2 \cos\alpha + w_2 \sin\alpha\,, \; w_1 = w_2 \cos\alpha - u_2 \sin\alpha\,,$$

$$\theta^{(1)}_1 = \theta^{(2)}_1, \quad M^{(1)}_1 = M^{(2)}_1\,,$$

$$N^{(1)}_1 - N^{(2)}_1 \cos\alpha + Q^{(2)}_1 \sin\alpha = 0\,,$$

$$-Q^{(1)}_1 + N^{(2)}_1 \sin\alpha + Q^{(2)}_1 \cos\alpha = 0\,. \quad (9)$$

Припускаємо, що поле залишкових деформацій в околі шва є гладким і має локальний характер, тобто

$$e^0_{jj}\Big|_{z=z_{0i}} = 0, \quad \frac{de^0_{jj}}{dz}\Bigg|_{z=z_{0i}} = 0, i = 1,2, j = 1,2\,. \quad (10)$$

Будуємо систему колокації на рівномірній сітці вузлів, яка співпадає з вузлами сплайнів. Враховуючи умови (9) та граничні умови (жорстке закріплення на краях), розв’язуємо систему із застосуванням критерію найменших квадратів. Ширину зони локалізації залишкових деформацій в околі шва, а саме значення координат z_{01}, z_{02} (рис.1) визначаємо мінімізуючи функціонал

$$J = \sum_{k=0}^{N} \left(\sigma^T_{+h_k} - S_3 \sigma^E_{+h_k} \right)^2 \quad (11)$$

за алгоритмом Гука-Дживса [4], який є процедурою прямого пошуку мінімуму функції багатьох змінних. Тут використано процедуру зі сталим кроком для обох змінних z_{01}, z_{02}.

На рис. 2 і рис. 3 зображено розподіл залишкових напружень та поле залишкових деформацій для циліндроконічної оболонкової конструкції. Конічна частина описується рівнянням $r(z) = z + R$, де R=710 мм, параметр a=1 (кут конусності=45^0). Товщина оболонки 2h=18,7мм, модуль Юнга E=2×10^5 МПа; коефіцієнт Пуассона ν=0,3 (сталь марки СТ10Г2ФБ).

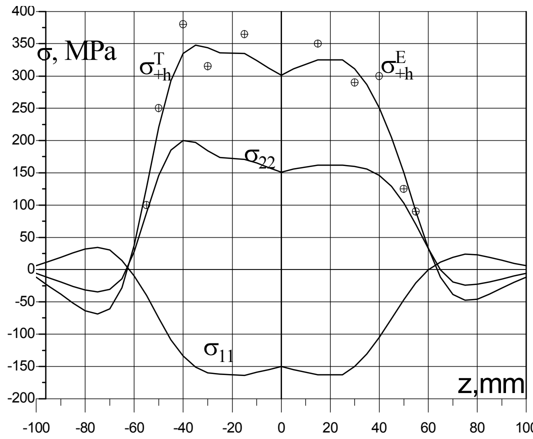

Рис.2 Залишкові напруження

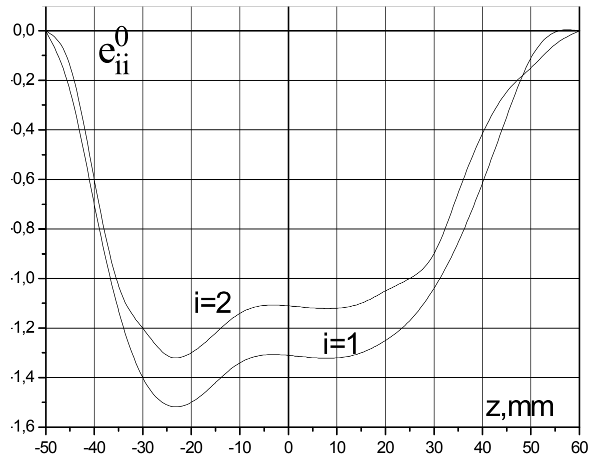

Рис. 3 Залишкові деформації $e^0_{ii} = e^0_{ii} \times 10^{-3}$

У розглянутій задачі поле залишкових деформацій локалізоване в околі шва на інтервалі від -50 мм до 60 мм і не має симетрії відносно лінії зварного шва (рис. 3). Для конструкції «циліндр-конус» досліджено, що для значень параметра a, більших від 0.8, з’являється вплив геометрії конуса. Зі збільшенням параметра a максимуми колових напружень σ_{22} зменшуються порівняно з максимумами цих напружень у циліндричній частині. Колові залишкові напруження в околі шва є розтягуючими, а осьові σ_{11} – стискальними. Усереднена величина різниці головних напружень σ^T_{+h} може значно перевищувати рівень максимальних значень як осьових, так і колових залишкових напружень. На рис. 2 кружечками позначено експериментальні значення σ^E_{+h}.

Висновки. Числово-експериментальний метод, розроблений у працях [7 –10], поширено на задачі, в яких поле залишкових деформацій описується некульовим тензором. Досліджено умови коректності та побудовано регуляризуючий алгоритм на основі апріорних припущень про локалізацію поля залишкових деформацій в околі зварного шва. Для конструкцій зварених з оболонок з різною геометрією запропоновано єдине сплайнове зображення розв’язку, що є регуляризуючим фактором й істотно спрощує обчислення. Програмне забезпечення методу може скласти основу для створення системи неруйнівного контролю над рівнем залишкових технологічних напружень у зварних оболонкових конструкціях приладів та машин.

Література

1. *Підстригач Я.С., Ярема С.Я.* Температурні напруження в оболонках. – Київ: Вид-во АН УРСР, 1961. – 212 с.

2. *Подстригач Я. С., Осадчук В. А., Марголин А. М.* Остаточные напряжения, длите-льная прочность и надежность стеклоконструкций. – К.: Наук. думка, 1991. – 289 с.

3. *Де Бор К.* Практическое руководство по сплайнам. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.

4. *Банди Б.* Методы оптимизации. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

5. *Кир'ян В. І., Осадчук В. А., Николишин М. М.* Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій. – Львів: Сполом, 2007. – 318 с.

6. *Осадчук В. А., Банахевич Ю. В., Іванчук О. О.*Визначення напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 2. – С. 99–104.

7. *Bazylevych L., Kushnir R., Nykolyshyn M.* Inverse problems of reproducing residual welding stresses in shells of revolution // Thermal Stresses'99: Third Int. Congr. on Thermal Stresses, June 13-17, 1999. – Cracow: Cracow Univ. Techn., 1999. – P. 467–470.

8. *Осадчук В. А., Базилевич Л. В.* Дослідження розподілу залишкових напружень в тонких конічних оболонках // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1996. – **32,** № 6. – С. 119–121.

9. *Осадчук В. А., Кир'ян В. І., Базилевич Л. В.* Обернена умовно коректна задача визначення залишкових напружень у складених зварних оболонках обертання // Мат. методи і фіз.-мех. поля. – 1997. – **40**, № 1. – С. 130–134.

10.*Тимчук Т., Базилевич Л., Банахевич Ю.* Задача ідентифікації зварних залишкових напружень в оболонкових елементах металоконструкцій // Мат. проблеми механіки неоднорідних структур. – Ін-т прикл. проблем механіки і матем. НАНУ. – Зб. статей в 2-х томах.– 2006. – Т. 2. – С. 242-244.

Отримана 17.06.10

M. Nykolyshyn, L. Bazylevych

The problem of identification of welded residual stresses in cylindrical-conic metal shell of revolution

Ya. Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

A numerical-experimental procedure for solution of inverse determination problems of residual stresses in shells of revolution using the spline-approximations and experimental data is developed. The research of residual stresses in a shell structure, consisting of welded cylindrical and conic metalic shells, is carried out.

Інформація

22nd EUROPEAN CONFERENCE ON DIAMOND, DIAMOND LIKE MATERIALS, CARBON NANOTUBES AND NITRIDES

Garmisch-Partenkirchen, Germany
September 4 — 8, 2011

http://www.diamond-conference.elsevier.com

DIAMOND is a leading international conference in the fields of diamond, DLC (diamond-like carbon), carbon nano-tubes, graphene, and nitrides. It brings together scientists and engineers with both fundamental and applied interests in these fields. At the conference, you will learn of current state-of-art as well as future trends of carbon and nitrides related applications.

The conference will discuss the significant improvements in material growth processes, material purity and doping of these materials over the past few years. The improvements have lead to the discovery of new phenomena in these materials as well as to novel device applications with increasingly impressive performance levels.

Abstracts are now being accepted in the following categories:

* Diamond
* DLC (diamond-like carbon)
* Graphene
* Carbon nanotubes
* III-nitrides: growth properties and applications