

УДК 621.791:539.3

Проф. М.М. Николишин¹, д-р фіз.-мат. наук;
 наук. співроб. Л.В. Базилевич¹, канд. фіз.-мат. наук;
 доц. І.Б. Назар², канд. техн. наук; доц. А.Р. Дзюбик², канд. техн. наук

РОЗПОДІЛ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОЛОГІЙ СФЕРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ В ОКОЛІ ВВАРЕНОГО КРУГОВОГО ЦИЛІНДРА

Із застосуванням числово-експериментальних методів, що ґрунтуються на розв'язанні обернених умовно-коректних задач теорії оболонок з власними напруженнями, можна отримати повну картину залишкових технологічних напружень та деформацій в околі кругових зварних швів на основі тієї частини напружень чи їх інтегральних характеристик, які вдається отримати, використовуючи експеримент. Запропоновано розв'язання такої задачі для пологої сферичної оболонки з ввареним круговим циліндром, для якої поле залишкових деформацій описується не кульовим тензором. Невідомий розв'язок ключового рівняння та поле залишкових деформацій у роботі показано як лінійні комбінації сплайнів з невідомими коефіцієнтами. Експериментальні дані отримано електромагнітним методом.

Ключові слова: ресурс, напруження, оболонка, круговий зварний шов, тензор.

Постановка проблеми. Для оцінки залишкового ресурсу зварних тонкостінних конструкцій тривалої експлуатації необхідно визначити в них залишкові напруження у зонах зварних з'єднань. Особливо актуально це є для кільцевих та кругових зварних швів стикових з'єднань, оскільки вони найбільш характерні для циліндричних елементів [1].

Залишкові зварні напруження та деформації у зоні стику оболонкових конструкцій завжди цікавлять спеціалістів, оскільки рівень залишкових напружень визначає працездатність таких з'єднань при змінних навантаженнях чи інших видах взаємодії. Зварні деформації, які зв'язані з достатньо значними радіальними переміщеннями стінки оболонки в зоні стику, можуть приводити до аварійних ситуацій. Ці явища важко змодельовати на зразках, а натурні експерименти, здійснені неруйнівними методами, у реальних конструкціях не дають повної інформації про напружено-деформований стан в околі зварних з'єднань.

Мета роботи. Числово-експериментальні методи, що ґрунтуються на розв'язанні обернених умовно-коректних задач теорії оболонок з власними напруженнями, можуть дати повну картину залишкових технологічних напружень та деформацій на основі тієї частини напружень чи їх інтегральних характеристик, які вдається отримати, використовуючи експеримент. Пропонуємо розв'язання такої задачі для пологої сферичної оболонки з ввареним круговим циліндром, для якої поле залишкових деформацій описується не кульовим тензором.

Постановка задачі та її розв'язання. Основні співвідношення теорії оболонок з залишковими деформаціями одержують, використавши зображення компонент тензора малої деформації $\{e_{ij}\}$ у вигляді суми: $e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p$, де e_{ij}^e – компоненти тензора повної деформації; e_{ij}^p – компоненти тензора пружної деформації; e_{ij}^0 – компоненти тензора умовних пластичних деформацій та дефор-

мацій, спричинених різними структурними перетвореннями, вони сукупно зумовлюють залишкові напруження.

Створити строгу математичну модель такої задачі не є можливою. У конкретних зварних конструкціях певними неруйнівними методами можна отримати дані, які дають змогу визначити частину компонент тензора залишкових напружень σ_{ij} чи їх інтегральні характеристики. Враховуючи це, можна отримати додатково рівняння між експериментально визначеними і теоретично представленими характеристиками полів напружень через розв'язки ключових рівнянь теорії оболонок, які містять невідомі компоненти інтегральних характеристик поля деформацій.

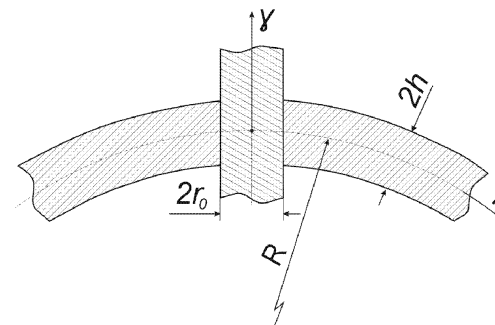


Рис. 1. Полога сферична оболонка з ввареним круговим циліндром

Розглянемо пологу сферичну оболонку товщиною $2h$ і радіусом середньої поверхні R зі ввареним у неї круговим циліндром з радіусом r_0 (рис. 1). Вважаємо умови зварювання такими, що напружено-деформований стан оболонки є симетричним відносно центру включення. Тоді ключове рівняння для визначення прогину w та функції напружень F має вигляд [2]

$$\nabla^2(\nabla^2\nabla^2 + 1)w = RF_1^0(\xi) - R^2c\nabla^2F_2^0(\xi)$$

$$F(\xi) = -D_1R\left[\left(1/R^2\right)c\nabla^2w(\xi) + F^*(\xi)\right], \quad (1)$$

де функцію F^* визначаємо з рівняння

$$\nabla^2F^*(\xi) = F_2^0(\xi), \quad F_1^0(\xi) = \nabla^2\varepsilon_{22}^0 - \frac{1}{\xi}\nabla(\varepsilon_{11}^0 - \varepsilon_{22}^0);$$

$$F_2^0(\xi) = \nabla^2(\kappa_{11}^0 + \nu\kappa_{22}^0) + (1-\nu)\frac{1}{\xi}\nabla(\kappa_{11}^0 - \kappa_{22}^0), \quad (2)$$

де: $\nabla^2 = \frac{d^2}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi}\frac{d}{d\xi}$, $\nabla = \frac{d}{d\xi}$; $c = \frac{h}{R\sqrt{3(1-\nu^2)}}$; $D_1 = D_0R^2c^2$; $D_0 = 2Eh$; $\xi = \frac{r}{R\sqrt{c}}$; r –

полярний радіус з полюсом в центрі включення. Тоді вирази для визначення радіальних та окружних зусиль та моментів отримаємо у такому вигляді:

$$N_{11} = \frac{1}{R^2c}\frac{1}{\xi}\frac{dF}{d\xi}, \quad N_{22} = \frac{1}{R^2c}\frac{1}{\xi}\frac{d^2F}{d\xi^2},$$

¹ Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАНУ;

² НУ "Львівська політехніка"

$$M_{11} = -D_0 c \left[\frac{d^2 w}{d\xi^2} + \frac{\nu}{\xi} \frac{dw}{d\xi} + R^2 c (\kappa_{11} + \nu \kappa_{22}) \right],$$

$$M_{22} = -D_0 c \left[\nu \frac{d^2 w}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{dw}{d\xi} + R^2 c (\kappa_{22} + \nu \kappa_{11}) \right].$$

А радіальні та кругові напруження в довільній точці оболонки визначимо за формулами:

$$\sigma_{11}(\xi, \gamma) = \frac{1}{2h} \left(N_{11} + \frac{3\gamma}{h^2} M_{11} \right) + \sigma_{11}^*(\xi, \gamma),$$

$$\sigma_{22}(\xi, \gamma) = \frac{1}{2h} \left(N_{22} + \frac{3\gamma}{h^2} M_{22} \right) + \sigma_{22}^*(\xi, \gamma),$$

де: $\sigma_{ii}^*(\xi, \gamma) = \frac{E}{1-\nu} (e_{ii}^0(\xi) + \kappa_{ii}^0(\xi) \gamma - e_{ii}^0(\xi, \gamma)), i = 1, 2;$

$$e_{ii}^0(\xi) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h e_{ii}^0(\xi, \gamma) d\gamma, \kappa_{ii}^0(\xi) = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h e_{ii}^0(\xi, \gamma) \gamma d\gamma.$$

Ключову функцію w подамо у вигляді лінійної комбінації базових нормалізованих сплайнів третього, п'ятого та сьомого порядків

$$w(\xi) = k_1 S_3^w(\xi) + k_2 S_5^w(\xi) + k_3 S_7^w(\xi),$$

де: $S_3^w(\xi) = \sum_{i=2}^2 b_i^w B_3^i(\xi), S_5^w(\xi) = \sum_{i=3}^3 b_i^w B_5^i(\xi), S_7^w(\xi) = \sum_{i=4}^4 b_i^w B_7^i(\xi)$ – подання через лінійні комбінації базових нормалізованих сплайнів; k_1, k_2, k_3 – вагові коефіцієнти.

Невідомі інтегральні характеристики поля залишкових деформацій подамо у вигляді кубічних сплайнів з невідомими коефіцієнтами з розкладом поля залишкових деформацій за товщиною оболонки до другого порядку:

$$e_{ij}^0(\xi, \gamma) = \begin{cases} S_{3ij}^{(0)}(\xi) + \gamma S_{3ij}^{(1)}(\xi) + \gamma^2 S_{3ij}^{(2)}(\xi), & \xi \leq \xi_{01} \\ 0, & \xi > \xi_{01} \end{cases},$$

де: $S_{3ij}^{(l)}(\xi) = \sum_{k=2}^2 b_{kij}^{(l)} B_{3ij}^k(\xi), l = 0, 1, 2, i, j = 1, 2, b_{kij}^{(l)}, b_{kij}^{(l)}$ – невідомі коефіцієнти. При цьому припускаємо, що поле залишкових деформацій в околі шва є гладким і має локальний характер

$$e_{ij}^0 \Big|_{\xi=\xi_{0i}} = 0, \frac{de_{ij}^0}{d\xi} \Big|_{\xi=\xi_{0i}} = 0, i = 1, 2, j = 1, 2$$

Експериментальні дані для розв'язування цієї умовно-коректної задачі отримуємо 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 пологої сферичної оболонки в околі звареного циліндра. Тоді теоретично отриманий вираз σ_{+h}^T матиме вигляд

$$\sigma_{+h}^T(\xi, b_k^w, b_{kij}^{(l)}) = \frac{2}{\pi r_0^2} \int_{\xi_n - r_0}^{\xi_n + r_0} [\sigma_{22}^+(\xi) - \sigma_{11}^+(\xi)] \sqrt{r_0^2 - (\xi - \xi_n)^2} d\xi, \quad (8)$$

де: $r_0 = R_0 / R$; R_0 – радіус круга, який є поверхнею контакту; ξ_n – координати центрів круга в околі включення під час вимірювань; $b_k^w, b_{kij}^{(l)}$ – невідомі коефіцієнти зображень (5-6).

Отримані значення $\sigma_{+h}^E(\xi)$ апроксимуємо згладжувальним кубічним поліноміальним сплайном для уникнення осциляцій від похибок вимірювання і внаслідок матимемо експериментальну криву $S_3 \sigma_{+h}^E(\xi)$.

На рівномірній сітці вузлів будуємо систему колокації. Враховуючи умови (7), розв'язуємо систему із застосуванням критерію найменших квадратів. Ширину зони локалізації залишкових деформацій в околі шва, а саме значення координати r_{01} (рис. 1) визначаємо мінімізуючи функціонал

$$J = \sum_{k=0}^N (\sigma_{+h_k}^T - S_3 \sigma_{+h_k}^E)^2. \quad (9)$$

Проведено розрахунки для пологої сферичної оболонки з такими фізичними параметрами: товщина оболонки $2h=18$ мм, радіус $R=640$ мм, модуль Юнга $E=2 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$ (сталь марки 10Г2ФБ). Зварений круговий циліндр має радіус $r_0=10$ мм, На рис. 2 та 3 зображено розподіл залишкових деформацій та залишкових напружень в околі зварного колового шва для дослідженої конструкції.

У цій задачі поле залишкових деформацій (рис. 2) локалізоване в околі зварного шва в межах від 10 до 60 мм, а усереднена величина різниці головних напружень σ_{+h}^T значно перевищує рівень максимальних значень як осьових, так і кругових залишкових напружень. На рис. 3 кружечками позначено експериментальні значення σ_{+h}^E , а суцільними лініями – усереднену в приповерхневому шарі різницю головних напружень σ_{+h}^T , та обчислені осьові та кругові залишкові напруження σ_{11}, σ_{22} .

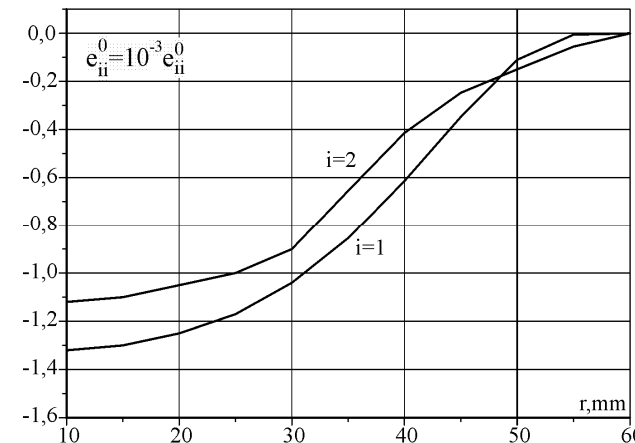


Рис. 2. Залишкові деформації

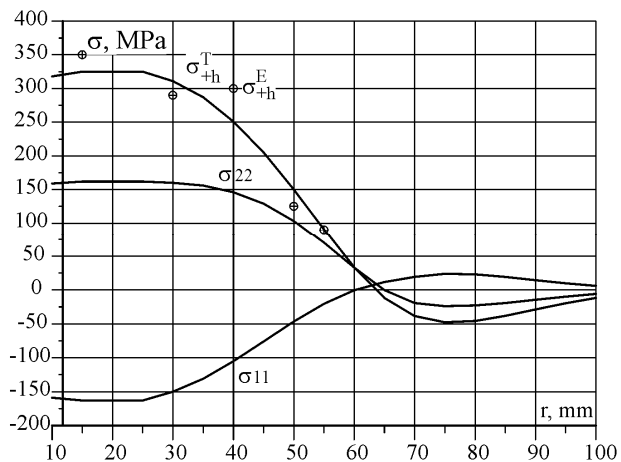


Рис. 3. Залишкові напруження

Висновки. Числово-експериментальний метод, розроблений у роботах [2-6] 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 пологої сферичної оболонки зі зварним у неї круговим циліндром запропоновано сплайнове зображення розв'язку, що є регуляризуючим фактором в даній умовно-коректній задачі і істотно спрощує обчислення. Програмне забезпечення запропонованого методу може скласти основу для створення системи неруйнівного контролю над рівнем залишкових технологічних напружень в зварних оболонкових конструкціях.

Література

1. Назар І.Б. Шляхи забезпечення ресурсу зварних стиків магістральних трубопроводів / І.Б. Назар, А.Р. Дзюбик, Р.В. Палаш // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій : зб. пр. 4-ої Міжнар. конф., 23.06.2009 р. – Львів. – С. 917-922.
2. Подстригач Я.С. Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций / Я.С. Подстригач, В.А. Осадчук, А.М. Марголин. – К. : Изд-во "Наук. думка", 1991. – 289 с.
3. Кир'ян В.І. Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій / В.І. Кир'ян, В.А. Осадчук, М.М. Николишин. – Львів : Вид-во "Сполом", 2007. – 318 с.
4. Николишин М.М. Задача ідентифікації зварних залишкових напружень в циліндро-конічній металевій оболонці обертання / М.М. Николишин, Л.В. Базилевич // Машинознавство. – 2010. – № 6(156). – С. 41-44.
5. Кир'ян В.І. Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій / В.І. Кир'ян, В.А. Осадчук, М.М. Николишин. – Львів : Вид-во "Сполом", 2007. – 318 с.
6. Осадчук В.А. Визначення напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів / В.А. Осадчук, Ю.В. Банахевич, О.О. Іванчук // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Вип. 42, № 2. – С. 99-104.

Ныколышин М.М., Базылевич Л.В., Назар И.Б., Дзюбык А.Р. Распределение остаточных напряжений в полой сферической оболочке в окрестности сваренного кругового цилиндра

С применением численно-экспериментальных методов, основанных на решении обратных условно-корректных задач теории оболочек с собственными напряжениями,

можно получить полную картину остаточных технологических напряжений и деформаций в окрестности круговых сварных швов на основе той части напряжений или их интегральных характеристик, которые удастся получить, используя эксперимент. Предложено решение такой задачи для полой сферической оболочки со сваренным круговым цилиндром, для которой поле остаточных деформаций описывается некульовым тензором. Неизвестное решение ключевого уравнения и поле остаточных деформаций в работе показано как линейные комбинации сплайнов с неизвестными коэффициентами. Экспериментальные данные получены электромагнитным методом.

Ключевые слова: ресурс, напряжение, оболочка, круговой сварной шов, тензор.

Nykolayshyn M.M., Bazylevych L.V., Nazar I.B., Dzyubyk A.R. Distribution of residual stresses in a shallow spherical shell in the vicinity of a welded in circular cylinder

With the use of numerical and experimental methods based on solving the inverse conditional correct problems in the theory of shells with their own stresses, you can get a full picture of residual technological stresses and strains in the vicinity of the circular welds on the basis of that part of the stress or their integral characteristics that can be obtained by using an experiment. The paper proposes solving this problem for shallow spherical shell with welded circular cylinder, for which the residual strain field is not described spherical tensor. Unknown solution key equations and residual strain field is shown as a linear combination of splines with unknown coefficients. Experimental data obtained by electromagnetic method.

Keywords: life, stress, shell, circular weld seam, tensor.

УДК 004.932.2:616-006.04

Доц. О.М. Березький, д-р техн. наук –
Тернопільський національний економічний університет

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЦИТОЛОГІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ЗАДАНОЮ ПОХИБКОЮ

Проведено аналіз цитологічних зображень, які входять до складу біомедичних зображень. Виділено характерні ознаки цитологічних зображень. Показано, що для аналізу біомедичних зображень використовують системи автоматизованої мікроскопії. Розроблено узагальнений алгоритм перетворення зображень. Він базується на запропонованих алгоритмах перетворення контурів і областей зображень. Розроблені алгоритми програмно реалізовані в середовищі Borland Delphi 7.0. Проведено комп'ютерні експерименти для визначення похибки перетворення зображень на прикладі цитологічних зображень ракових клітин молочної залози.

Ключові слова: ракові клітини, перетворення, біомедичні зображення, цитологічні зображення, похибка, контур, область.

Вступ. Біомедичними зображеннями (БМЗ) назвемо растрові зображення, отримані за допомогою будь-якої біомедичної техніки. Їх використовують для візуального аналізу у медицині та біології.

Цитологічні зображення (ЦЗ) отримуються від світлової мікроскопії. Цитологічний метод є одним із методів дослідження та діагностування ракових клітин. Мікрооб'єктами на ЦЗ є окремі, випадково розміщені клітини. Для кількісного опису мікрооб'єктів на ЦЗ використовують такі ознаки: площа клітини, площа ядра клітини, оптична щільність ядра клітини за шкалою градацій "сірого", площа цитоплазми клітини тощо [1].

Для якісного опису мікрооб'єктів на ЦЗ використовують такі ознаки: границі цитоплазми (чіткі, нечіткі), локалізація вакуолей (по периферії, біля яд-