

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

МУСІЯЧЕНКО
Андрій Валентинович

УДК 539.3


**МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ НЕОСЕСИМЕТРИЧНОЇ
НЕІЗОТЕРМІЧНОЇ ЗАДАЧІ ТЕРМОПЛАСТИЧНОСТІ
ДЛЯ ТОНКОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ**

01.02.04 —

— механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізиків-математичних наук

Київ 1995



Робота виконана у відділі математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні металів
електрозварювання ім. Є.О.Пат

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761392 (S)

Науковий керівник: академік
доктор фізико-математичних наук
професор В.І.Махненко.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор Я.М.Григоренко,

кандидат фізико-математичних наук,
доцент Т.Ю.Кепич.

Провідна організація: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України (м.Львів).

Захист відбудеться "20" листопада 1995р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої ради К 01.01.29 при механіко-математичному факультеті Київського університету ім.Тараса Шевченка за адресою: м.Київ, проспект академіка Глушкова 6, КДУ, механіко-математичний факультет.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського університету ім.Тараса Шевченка.

Відгук на автореферат просимо надсилати на адресу: 252017, Київ-17, вул.Володимирська 64, КДУ, мех.-мат. факультет, вченому секретарю спеціалізованої ради, доценту Каліону В.А.

Автореферат розіслано "10" листопада 1995р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
кандидат фіз.-мат. наук

В.А.Каліон.

ЛНБ України ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. В різних галузях техніки широко застосовуються конструкції, елементи яких виконані у вигляді тонких циліндричних оболонок. Умовою навантаження при виготовленні і експлуатації для багатьох таких елементів, окрім силових навантажень, є нестационарний неосесиметричний нагрів, який часто супроводжується виникненням великих градієнтів температур. Прикладом роботи елементів конструкцій в умовах високотемпературного нагріву може служити накладання на них зварних швів. В цьому випадку теплове навантаження задається рухомим висококонцентрованим джерелом тепла, а температура в тілі розподіляється за досить складними законами в просторі і часі.

Утворення напружень та деформацій в елементах конструкцій, що розглядаються, під дією силового та температурного навантаження становить досить складний процес, який супроводжується суттєвими змінами фізико-механічних властивостей матеріалу, появою разом з пружними деформаціями, деформацій пластичності і повзучості.

Розробці методів розрахунку та розв'язанню конкретних задач визначення неосесиметричного напружено-деформованого стану (НДС) тонких оболонок, матеріал яких крім пружних зазнає непружні деформації, присвячені праці В.М.Безменова, В.І.Берлянда, Н.А.Белевцової, І.А.Біргера, О.М.Гузя, Л.В.Єнджієвського, Б.Я.Кантора, М.С.Корнішина, В.А.Мерзлякова, І.В.Прохоренка, Е.А.Сторожука, І.С.Чернишенка, Ю.М.Шевченка та інших авторів.

Серед великої кількості викладених в них підходів слід відзначити, що зараз розроблені методи визначення неосесиметричного НДС тонких оболонок обертання при неізотермічних процесах навантаження, які ґрунтуються на представленні розв'язуючих функцій у вигляді тригонометричних рядів за коловою координатою та чисельному інтегруванні розв'язуючих рівнянь методом дискретної ортогоналізації. Лінеаризація фізичних рівнянь в них здійснюється за допомогою методу додаткових деформацій. Такий підхід дозволяє досліджувати досить прості процеси навантаження за прямолінійними траєкторіями деформування і траєкторіями малої кривизни. Існуючі методи не дозволяють у повній мірі досліджувати термопластичний стан тонких оболонок обертання при складних неізотермічних процесах навантаження, наприклад, у випадках високотемпературного локального нагріву, теплового навантаження рухомим джерелом тепла, прикладанні тепла довільно до поверхні оболонки. Використання при розв'язанні таких задач методу скінчених елементів з розкриттям фізичної нелінійності методом змінних параметрів пружності та до-

даткових деформацій має ряд труднощів, таких, як формування вихідних даних, подання результатів розрахунку, обмеженість необхідних для успішної роботи програм об'єму оперативної пам'яті та швидкодії ЕОМ.

Тому розробка ефективних методів розрахунку, які дозволяють розв'язувати задачу термопластичності для циліндричних оболонок, що знаходяться під дією складного неосесиметричного нагріву і силового навантаження, є актуальною проблемою, яка має значне теоретичне і практичне значення.

Метою роботи є розробка розрахункового методу визначення неосесиметричного НДС тонких циліндричних оболонок для складних неізотермічних процесів навантаження за траєкторіями навантаження, що суттєво відрізняються від прямолінійних, розв'язання нових задач розрахунку тимчасового та залишкового НДС циліндричних оболонок.

Наукова новизна роботи полягає:

- для коротких циліндричних оболонок розроблено метод розрахунку НДС під дією складного неосесиметричного неізотермічного навантаження за траєкторіями навантаження, які суттєво відрізняються від прямолінійних;

- вперше при визначенні неосесиметричного НДС циліндричних оболонок для розкриття фізичної нелінійності використовується метод змінних параметрів пружності та додаткових деформацій;

- застосування до одержаної в роботі системи розв'язуючих рівнянь методу прямих і методу зведення граничної задачі для системи звичайних диференціальних рівнянь до задачі Коші дозволило відмовитись від використовуваного при розв'язанні таких задач методу скінчених елементів;

- за допомогою розробленого програмного забезпечення розв'язані нові задачі визначення НДС циліндричних оболонок під дією неосесиметричного нагріву при накладанні зварних швів.

Достовірність розробленої методики і одержаних результатів визначається межами моделей і гіпотез, які використовуються, коректністю математичної постановки задачі, строгістю математичних викладок та використанням обґрунтованих методів розв'язання, узгодженням розв'язків, отриманих на різних просторових і часових сітках, а також узгодженням результатів кількісного аналізу з відомими експериментальними та розрахунковими даними. Методика апробована на ряді задач, що розв'язані іншими методами.

Практична цінність. На основі запропонованого методу розроблено програмне забезпечення для дослідження НДС оболонкових елементів

конструкцій під дією несесиметричного високотемпературного та силового навантаження. Однією з областей його практичного використання може бути дослідження напружень та деформацій в циліндричних оболонках при накладанні на них зварних швів складної геометрії. Як правило, для розв'язання подібних задач термопластичності при ступенях вільності 10^4 і вище, використовуються досить громіздкі пакети програм, засновані на методі скінчених елементів, що потребують потужних обчислювальних засобів і відповідної кваліфікації у користувача. Розроблене програмне забезпечення дозволяє розв'язувати задачу більш ефективно, з мінімальним використанням оперативної пам'яті і з мінімальними витратами машинного часу. Розроблений дружній інтерфейс не потребує спеціальних знань і навичок в описі об'єкту, при виборі граничних умов, наведенні результатів розрахунку і т.ін. Це робить можливим використання розробленого програмного забезпечення в інженерній практиці. Результати розглянутих задач можуть бути використані при розробці нових конструктивних елементів сучасної техніки.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідались на Міжнародній конференції "Сварные конструкции" (Київ, 1990), VIII конференції молодих вчених Інституту механіки АН Вірменії (Єреван, 1991), Науковій нараді "Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций" (Канів, 1992), науково-технічному семінарі "Моделирование физико-химических процессов, создание банков данных, расчетно-информационных и экспертных систем в области сварки и родственных технологий" (Алушта, 1993), науковому семінарі Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона (Київ, 1994), наукових семінарах "Проблемы прочности и механики материалов" та "Современные проблемы механики" Київського університету ім.Тараса Шевченка (Київ, 1995).

Публікації. Основні результати досліджень викладені у 5 працях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, трьох глав, висновків та списку літератури, містить 143 сторінки друкованого тексту, містить 36 малюнків та 2 таблиці. Бібліографія до роботи включає 120 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначається актуальність роботи, сформульована її мета, показана наукова новизна та практична значущість, надана стисла характеристика розділів дисертації.

В першому розділі здійснено аналіз існуючих методів визначення

пружнопластичного стану тонких оболонок обертання, сформульовані основні задачі, які виникають при розробці методу розрахунку неосесиметричного НДС тонких циліндричних оболонок при складних процесах навантаження.

Наступні параграфи розділу присвячені математичній постановці задачі термопластичності для тонкої циліндричної оболонки.

Використовується геометрично лінійна теорія оболонок, що базується на гіпотезах Кірхгофа-Лява. Припускається, що оболонка знаходиться під дією неосесиметричного силового і температурного навантаження, механічні і теплофізичні властивості матеріалу оболонки змінюються в меридіональному та коловому напрямках, а також залежать від температури. Задача розглядається в квазістатичній постановці. Припускається, що деформації повзучості малі по відношенню до миттєвих пружнопластичних деформацій, і ними можна знехтувати. За основну фізичну модель береться модель, яка заснована на теорії неізотермічного пластичного течіння асоційованого з умовою текучості Мізеса.

У відповідності до вибраної моделі рівняння зв'язку між напруженнями та деформаціями мають вигляд

$$d\epsilon_{ij} \approx d\left(\frac{\sigma_{ij}}{2G} + \delta_{ij}\left(K - \frac{1}{2G}\right)\sigma + \varphi\right) + (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)(d\lambda + \Phi dt), \quad (1)$$

де скалярний множник $d\lambda$ визначається умовами:

$$\begin{aligned} d\lambda &= 0, & \text{якщо } f &= \sigma_i^2 - \sigma_i^2(T) < 0; \\ 0 < d\lambda &= \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_i^p}{\sigma_i}, & \text{якщо } f &= 0; \\ f > 0 & & \text{недопустимо.} \end{aligned} \quad (2)$$

приріст інтенсивності пластичних деформацій $d\epsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\epsilon_{xx}^e - d\epsilon_{yy}^e)^2 + (d\epsilon_{xx}^e - d\epsilon_{zz}^e)^2 + (d\epsilon_{yy}^e - d\epsilon_{zz}^e)^2 + 6(d\epsilon_{xx}^e)^2 + 6(d\epsilon_{yy}^e)^2 + 6(d\epsilon_{zz}^e)^2 \right]^{0.5}$

В наведених рівняннях σ_{ij} , ϵ_{ij} ($i, j = x, y, z$) - компоненти тензорів напружень та деформацій; $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$ - середній тиск в точці; $G(T)$, $K(T)$ - модулі зсуву та об'ємного стиску; $\varphi = \alpha(T)(T - T_0)$ - функція теплового розширення, де $\alpha(T)$ - коефіцієнт відносного теплового розширення; T - температура; $f = \sigma_i^2 - \sigma_i^2(T)$ - функція текучості, де $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2) \right]^{0.5}$.

Величини $0 \leq \rho < 1$, $m \ll (\sigma, T)$, $\delta \ll l$ - є параметрами ітераційного процесу, які визначають швидкість і точність збіжності; (n) та $(n+1)$ - номери ітерацій.

Така лінеаризація задачі термопластичного деформування передбачає розв'язання на кожному етапі простежування і кожній ітерації по ψ крайової задачі по типу пружної, але зі змінними параметрами пружності і додатковими деформаціями.

І введени у першому розділі для тонкої циліндричної оболонки рівняння рівноваги, кінематичні співвідношення між прирістами деформацій серединної поверхні і прирістами переміщень, рівняння зв'язку між зведеними зусиллями, моментами та відповідними прирістами деформацій серединної поверхні, доповнені граничними умовами, становлять замкнену систему на кожному етапі простежування і кожній ітерації по ψ . Сукупність та послідовне розв'язання таких задач дозволяють, виконавши зазначеним чином лінеаризацію, розв'язати задачу термопластичності.

У другому розділі одержана розв'язуюча система рівнянь для визначення неосесиметричного НДС циліндричних оболонок.

За основні невідомі обрані функції: N_r, N_z - радіальне та осьове зусилля відповідно; \hat{S} - зведене зсувне зусилля; M_z - меридіональний згинаючий момент; Δw ; Δu ; Δv - прирісти переміщень серединної поверхні в нормальному, осьовому та коловому напрямках відповідно; $\Delta \vartheta_z$ - приріст кута повороту нормалі.

Перетворення статичних та геометричних рівнянь разом з рівняннями зв'язку дозволяє отримати розв'язуючу систему диференціальних рівнянь в частинних похідних четвертого порядку зі змінними коефіцієнтами та додатковими членами, що враховують історію навантаження та фізичну нелінійність.

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial z} = F \left(\frac{\partial^4 \bar{y}}{\partial \theta^4}; \frac{\partial^3 \bar{y}}{\partial \theta^3}; \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial \theta^2}; \frac{\partial \bar{y}}{\partial \theta}; \bar{y}; z; \theta \right) + \bar{f}(z, \theta), \quad (7)$$

де \bar{y} - невідома вектор-функція $\bar{y} = (N_r, N_z, \hat{S}, M_z, \Delta w, \Delta u, \Delta v, \Delta \vartheta_z)$;

$\bar{f}(z, \theta) = (f_1, f_2, \dots, f_8)$ - вектор-стовпець правих частин; z, θ - осьова та колова координати, F - диференціальний оператор.

В сукупності з заданими граничними умовами, система (7) визначає крайову задачу, розв'язком якої є основні функції \bar{y} .

Зведення двовимірної крайової задачі до одновимірної здійснюється

методом прямих. Його застосування по коловій координаті зводить систему (7) до лінійної системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку у нормальній формі Коші

$$\frac{d\bar{y}_i}{dz} = \sum_{j=1}^5 A_i^{(j)}(z)\bar{y}_{i+j-1} + \bar{g}_i(z), \quad (i = 1, 2, \dots, m; z_0 \leq z \leq z_L). \quad (8)$$

де \bar{y}_i - вектор шуканих функцій, індекс i відноситься до лінії вузлів при розбитті прямокутної області $[0, L] \times [0, 2\pi R]$ розгорнутої циліндричної поверхні оболонки; m - кількість точок апроксимації, $A_i^{(j)}(z)$, ($j = 1, 5$) - матриці коефіцієнтів апроксимації розмірності 8×8 ; $\bar{g}_i(z)$ - вектор правих частин.

Розв'язок системи (8) повиний задовольняти граничним умовам

$$\begin{aligned} B_i^{(0)}\bar{y}_i &= b_i^{(0)}, & \text{при } z = z_0; \\ B_i^{(L)}\bar{y}_i &= b_i^{(L)}, & \text{при } z = z_L; \end{aligned} \quad (9)$$

$(i = 1, 2, \dots, m).$

$b_i^{(0)}$ і $b_i^{(L)}$ - задані вектор-стовпці, на лівому та правому контурах оболонки; $B_i^{(0)}$ і $B_i^{(L)}$ - задані прямокутні матриці граничних умов.

Розв'язок задачі (8), (9) знаходиться чисельним методом зведення крайової задачі для системи звичайних диференціальних рівнянь до задачі Коші. Вибір вказаного методу дозволяє одержати рішення з мінімальними витратами часу ЕОМ на реалізацію обчислювального процесу та мінімальним використанням об'єму оперативної пам'яті.

Розв'язок крайової задачі (8), (9) є множиною значень основних функцій у вузлових точках серединної поверхні оболонки. Через ці величини знаходяться компоненти напружень, деформацій та переміщень. Послідовне розв'язання таких задач дозволяє за допомогою розглянутих методів лінеаризації розв'язати задачу термопластичності.

Для розв'язку задачі термопластичності, згідно з методом послідовного простежування, необхідно знати температурне поле оболонки у тих самих вузлах сіткової області і для тих самих моментів часу, для яких визначається НДС. Алгоритм визначення нестационарного температурного поля наведено в другому розділі.

При розв'язанні нестационарної задачі теплопровідності припускається, що оболонка знаходиться в умовах вільного теплообміну з оточуючим середовищем. За умовою тонкостінності розподіл температури по товщині оболонки приймається рівномірним. Для розв'язку двовимірної задачі теплопровідності зі змінними коефіцієнтами застосовується метод скінченних різниць. Одержана система різницевих рівнянь розв'язується

одностроковим методом блочної ітерації, який зводить розв'язок системи $n \times n$ алгебраїчних рівнянь до розв'язку системи порядку n .

В цьому ж розділі розроблено алгоритм визначення НДС тонких циліндричних оболонок під дією неосесиметричного навантаження.

Для оцінки достовірності і точності алгоритму та розробленого на його основі програмного забезпечення розглянуто два приклади. В першому з них розраховується залишковий НДС при накладанні однопровідного кільцевого шва при зварюванні встик сталених циліндричних оболонок. У другому - радіальні переміщення, які виникають в сталених циліндричних оболонках при накладанні прямолінійного зварного шва. В обох прикладах результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними, які мають місце, та результатами розрахунків за іншими методиками і програмами.

Результати чисельних експериментів виявили обмеження методу. Для довгих циліндричних оболонок метод зведення стає нестійким до граничних умов, втрачається їх зв'язок. Тому метод, в цілому, рекомендовано для коротких оболонок. Проте, і для коротких оболонок існує велике коло практично важливих задач.

У третьому розділі запропонована методика застосовується до розв'язання нових задач розрахунку залишкового НДС в циліндричних оболонках при накладанні зварних швів.

В першій задачі розглядається залишковий НДС при накладанні поздовжнього зварного шва на оболонку зі сталі перлітного класу довжиною $L=84$ мм, радіусом серединної поверхні $R=49$ мм, товщиною $\delta=4$ мм. Тепловий режим задавався джерелом нагріву з погонною потужністю $q_n=416$ кДж/м. Температурне поле розраховувалося по схемі швидко рухомого джерела. На краях оболонки задавалися граничні умови шарнірного закріплення, що відповідає випадку привареної заглушки.

Аналіз результатів розрахунку (рис.1) показав, що залишкові напруження розподіляються нерівномірно по товщині оболонки, до того ж для поздовжніх напружень σ_{xx} з віддаленням від країв нерівномірність зміння по товщині зменшується. Найбільш високі залишкові напруження σ_{xx} і $\sigma_{\theta\theta}$ мають місце в зоні зварного шва, а також поблизу країв оболонки на внутрішній поверхні. В середній частині оболонки ($z=L/2$) на зовнішній та внутрішній поверхнях в зоні шва напруження σ_{xx} - розтягуючі, близькі за величиною в зоні шва напруження $\sigma_{\theta\theta}$ на деякій відстані від шва стають протилежного знаку, однак також близькими за

абсолютною величиною. Значення максимальних напружень за абсолютною величиною близькі до границі текучості матеріалу. Розподіл поздовжніх напружень σ_{zz} має багато спільного з розподілом напружень при зварюванні вільних тонких пластин.

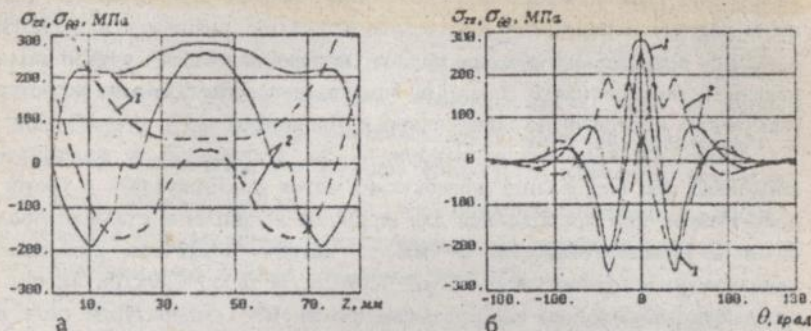


Рис.1. Розподіл залишкових напружень σ_{zz} — —; $\sigma_{\theta\theta}$ - - - - поздовж /а/ та поперек /б/ зварного шву: 1 - на внутрішній; 2 - на зовнішній поверхнях.

Дослідження впливу погонної потужності джерела зварювання та довжини оболонки на величину прогину показали, що після остигання, вздовж лінії зварювання середина поверхня вигинається усередину оболонки. Незначальна випуклість має місце лише поблизу країв оболонки, а також на деякій відстані від шва. Найбільшої величини прогин досягає в середній частині оболонки. Зі збільшенням потужності джерела і довжини оболонки прогин росте.

У другій задачі проведено дослідження залишкового напруженого стану циліндричних оболонок при накладанні коротких зварних швів.

Розрахунок проводився для сталюї оболонки з $L=150$ мм, $R=148$ мм, $\delta=4$ мм та жорстко закріпленими кряями. Були розглянуті випадки накладання поздовжнього і поперечного зварних швів довжиною $l_q=68$ мм з $q_n=589$ кДж/м, а також двох взаємоперпендикулярних швів довжиною $l_q=24$ мм та $l_q=22$ мм з $q_n=333$ кДж/м.

Розподіл напружень при накладанні короткого поздовжнього шва має багато спільного з розподілом при накладанні зварного шва вздовж всієї довжини твірної оболонки. Розподіл напружень, що виникають при накладанні короткого поперечного шва в середній частині шва має багато спільного з розподілом напружень при накладанні кільцевих швів. Сут-

спільного з розподілом напружень при накладанні кільцевих швів. Суттєві відмінності спостерігаються лише в кінцевій зоні короткого шва. При одночасному накладанні двох швів уздовж як поздовжнього так і поперечного швів картина розподілу напружень є досить складною. Вдovж поздовжнього шва характер розподілу напружень співпадає з характером розподілу біля окремого поздовжнього шва. Розподіл напружень уздовж поперечного шва відрізняється від розподілу для окремого шва. На розподіл напружень уздовж поперечного шва суттєво впливає наявність поздовжнього шва. Це можна пояснити більшою жорсткістю поперечних перерізів по відношенню до поздовжніх.

Розподіл залишкових напружень та деформацій в циліндричних оболонках при вварюванні прямокутних латок досліджувався в третій задачі. Розрахунки проводились для шарнірно закріпленої сталеної оболонки з $L=140\text{мм}$, $R=250\text{мм}$, $\delta=4\text{мм}$ та латкою $40\times 224\text{мм}$. Дослідження здійснювалось для потужностей $q_n=120\text{кДж/м}$ та $q_n=240\text{кДж/м}$, що відповідають зварюванню електронним променем. Температурне поле розраховувалося за схемою швидкорухомого джерела.

Після остигання в зоні латки серединна поверхня оболонки вигинається усередину. Прогин досягає свого найбільшого значення уздовж лінії зварювання. Зі зростанням погонної потужності величина прогину росте. Перевага прогину в поздовжніх швах над прогином в швах поперечних зв'язано з більшою жорсткістю поперечних перерізів по відношенню до поздовжніх. В цілому ж вварювання латки в циліндричну оболонку супроводжується корсетністю поздовжніх перерізів в районі латки.

Уздовж поздовжніх швів переважають поздовжні залишкові напруження σ_{zz} , які досягають границі текучості і є розтягуючими на внутрішній поверхні оболонки і стискаючими на зовнішній. З переміщенням до центру латки їх величина зменшується. Поперечні напруження $\sigma_{\theta\theta}$ досягають свого найбільшого значення поблизу поперечних швів. На внутрішній поверхні напруження $\sigma_{\theta\theta}$ розтягуючі, їх величина вища ніж на зовнішній. Знак поперечних напружень на зовнішній поверхні залежить від величини погонної потужності. Характер розподілу напружень σ_{zz} , $\sigma_{\theta\theta}$ поблизу поперечних зварних швів наближається до характеру розподілу напружень поблизу кільцевого шва в циліндричній оболонці. В усій оболонці напруження зсуву невеликі.

Вплив неодночасності виконання зварювання кільцевого шва на залишкові напруження та деформації досліджено у четвертій задачі.

Чисельний аналіз впливу швидкості руху джерела тепла при зварюванні встик циліндричних колець із труб на розподіл в них залишкових

напружень та деформацій розглядається на прикладі однопрохідного дугового зварювання конструкції з окремих зварних колець з геометричними розмірами $L=42\text{мм}$, $R=69\text{мм}$, $\delta=6\text{мм}$. на погонній енергії $q_n/\delta=220\text{МДж/м}^2$. Швидкість зварювання $v_{\text{св}}$ варіювалась в межах від $2,78\text{мм/с}$ до $11,12\text{мм/с}$. На краях колець задавались умови шарнірного закріплення.

В значній частині довжини шва залишкові напруження однакові для різних швидкостей зварювання і відповідають $v_{\text{св}} \rightarrow \infty$ та заданій погонній енергії. Скінченність швидкості руху джерела виявляється в невеликій зоні на початку (кінці) шва (рис.2), де значення напружень суттєво інші. Довжина цієї зони для даної оболонки становить $\approx 2\sqrt{R\delta}=40\text{мм}$. Різниця між величинами напружень в указаній зоні і в основній частині довжини шва значна і досягає 300МПа , однак зі зростанням швидкості зварювання вона зменшується. Цей ефект не може бути врахований поширеними осесиметричними розрахунковими схемами.

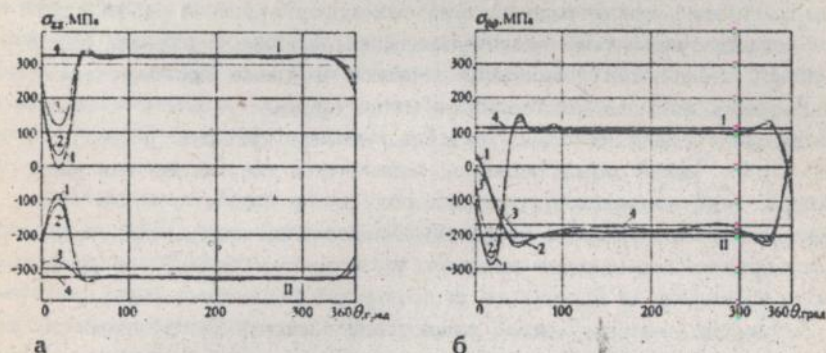


Рис.2. Розподіл залишкових напружень вздовж осі зварного шву на внутрішній - 1 та на зовнішній - 2 поверхнях: 1 - $v_{\text{св}}=2,78\text{мм/с}$; 2 - 5,56; 3 - 11,1; 4 - $v_{\text{св}} \rightarrow \infty$;

Вплив швидкості зварювання суттєво позначається і на нормальних залишкових прогинах w уздовж осі шва, де зона початку (кінця) більш довга, а в середній частині шва величина прогину досить помітно залежить від швидкості зварювання, збільшуючись зі зростанням останньої. Зі зростанням швидкості зварювання при $q_n = \text{const}$ нерівномірність розподілу прогинів вздовж кола зменшується. Вплив шарнірного закріплення при малих L різко змінює розподіл залишкових напружень уздовж

твірної по відношенню до досить довгих труб. Цей ефект слід враховувати при зварюванні подібних елементів. Останнє досить характерне, наприклад при зварюванні роторів газових турбін з малої ширини кільцевих елементів.

В закінченні сформульовані основні результати та висновки роботи:

1. Розроблено метод визначення НДС в тонких циліндричних оболонках під дією неосесиметричного нагріву та силового навантаження. Покладена в основу методу теорія неізотермічного пластичного течіння дозволяє за допомогою методу послідовного простежування розвитку пружнопластичних деформацій та методу послідовних уточнень звести розв'язок задачі термопластичності до сукупності задач, що послідовно розв'язуються і які формально відповідають задачам теорії пружності зі змінним модулем зсуву та додатковими деформаціями. Це робить можливим визначення НДС циліндричних оболонок при складних неізотермічних процесах навантаження по траєкторіях навантаження, які суттєво відрізняються від прямолінійних.

2. Для розв'язку на кожному етапі простежування задач зі змінними параметрами пружності та додатковими деформаціями: в роботі одержана розв'язуюча система двовимірних диференціальних рівнянь, яка в сукупності з заданими граничними умовами визначає крайову задачу. Для її розв'язання використовується метод прямих та метод зведення крайової задачі для системи звичайних диференціальних рівнянь до задачі Коші. Такий підхід дозволяє відмовитися від методу скінчених елементів, який використовується при розв'язанні подібних задач. Розроблено алгоритм і створено проблемно-орієнтований програмний модуль для чисельного дослідження кінетики та залишкового НДС в циліндричних оболонках.

3. Порівнянням результатів розрахунків з експериментальними даними, а також з результатами розрахунків одержаних за іншими розрахунковими схемами, встановлено, що розроблений метод дозволяє одержати достовірні результати з досить високою точністю. Показано, що метод можливо використовувати при розрахунках циліндричних оболонок, які працюють в умовах високотемпературного нагріву, зокрема, при розрахунках напружень і деформацій при зварюванні.

4. За допомогою розробленого методу в дисертаційній роботі розв'язані нові задачі розрахунку зварювальних напружень і деформацій. Дослідження залишкового НДС в циліндричних оболонках при накладанні поздовжнього шва показує, що найбільш високі напруження мають місце в зоні зварного шва на внутрішній поверхні оболонки, де їх

значення за абсолютною величиною близькі до границі текучості. Встановлено, що розподіл поздовжніх напружень має багату спільного з розподілом напружень при зварюванні вільних тонких пластин. Досліджено вплив погонної потужності джерела зварювання та довжини оболонки на зміну форми її поверхні.

5. Розв'язана задача визначення НДС оболонки при накладанні коротких зварних швів різної орієнтації.

6. Результати розрахунку деформівного стану циліндричних оболонок при вварюванні латок прямокутної форми свідчать, що вварювання латок супроводжується корсетністю поздовжніх перерізів в районі латки, яка росте зі зростанням погонної енергії і найбільш виявляється вздовж ліній зварювання. Виявлено особливості розподілу залишкових напружень.

7. Чисельне дослідження впливу швидкості руху джерела зварювання при накладанні кільцевого шва дозволило встановити, що скінченність швидкості руху джерела виявляється в невеликій зоні початку (кінця) шва. Різниця між величинами напружень в цій зоні та в основній частині довжини шва значна і може досягати границі текучості. Вплив швидкості зварювання суттєво позначається і на нормальних залишкових прогинах вздовж осі шва. Відмінність залишкового НДС при накладанні кільцевого шва від осесиметричного зростає зі зменшенням швидкості руху джерела, що слід враховувати при розрахунках відповідальних елементів конструкцій.

8. Застосування розробленого методу до розв'язання ряду задач визначення НДС циліндричних оболонок при зварювальному нагріві свідчать про можливість його використання для надання рекомендацій по зниженню рівня залишкових напружень та деформацій за допомогою вибору різних технологічних заходів, таких як режим зварювання, початковий або супутній нагрів, термообробка та інших.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Мусяченко А.В. Расчетный алгоритм для определения напряженно-деформированного состояния при неосесимметричном нагреве тонких цилиндрических оболочек //Тезисы докладов Международной конференции "Сварочные конструкции", Киев, 24-28 сент., 1990. - К., 1990. - С.106.

2. Мусяченко А.В. Численный метод расчета неосесимметричного напряженно-деформированного состояния тонкостенных цилиндрических оболочек при неизо-термических процессах нагружения //Материалы VIII конференции молодых ученых Института механики АН Армении, - Ереван, 1991. - С.25.

3. Мусяченко А.В. Расчет напряжений и деформаций в тонкостенных цилиндрических оболочках при вварке впадат прямоугольной формы //Труды Сове-

пация "Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций", Канев, 1992. - К., 1992. - С.24.

4. Махненко В.И., Великоиваненко Е.А., Мусияченко А.В. Неосесимметричное распределение напряжений и остаточных деформаций при сварке тонкостенных цилиндрических оболочек // Автоматическая сварка. - 1993, N4. - С.3-7.

5. Махненко В.И., Великоиваненко Е.А., Мусияченко А.В. Влияние неодновременности выполнения сварки кольцевого шва на остаточные напряжения и деформации в цилиндрической оболочке // Автоматическая сварка. - 1994, N11. - С.7-10.

АННОТАЦИЯ.

Мусияченко А.В. Метод решения неосесимметричной неизо-термической задачи термопластичности для тонкостенной цилиндрической оболочки.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела, Киевский университет им.Тараса Шевченко, Киев, 1995.

Защищается 5 научных работ. В них разработан метод расчета неосесимметричного напряженно-деформированного состояния тонкостенных цилиндрических оболочек при сложных неизо-термических процессах нагружения по траекториям нагружения существенно отличающимся от прямолинейных. С помощью разработанного метода решены новые задачи по определению НДС цилиндрических оболочек под действием неосесимметричного нагрева, имеющем место при наложении сварных швов различной геометрии. Исследованы особенности распределения остаточных напряжений и деформаций при наложении прямолинейного шва, коротких швов различной ориентации, сварке заплата в цилиндрическую оболочку. Численно установлено наличие зоны начала (конца) шва при учете скорости движения сварочного источника при сварке цилиндрических колец.

Ключові слова:

напруження, деформації, неізотермічне пластичне течіння, циліндрична оболонка, зварюнок, нагрів, неосесиметричний, зварювання.

ABSTRACT

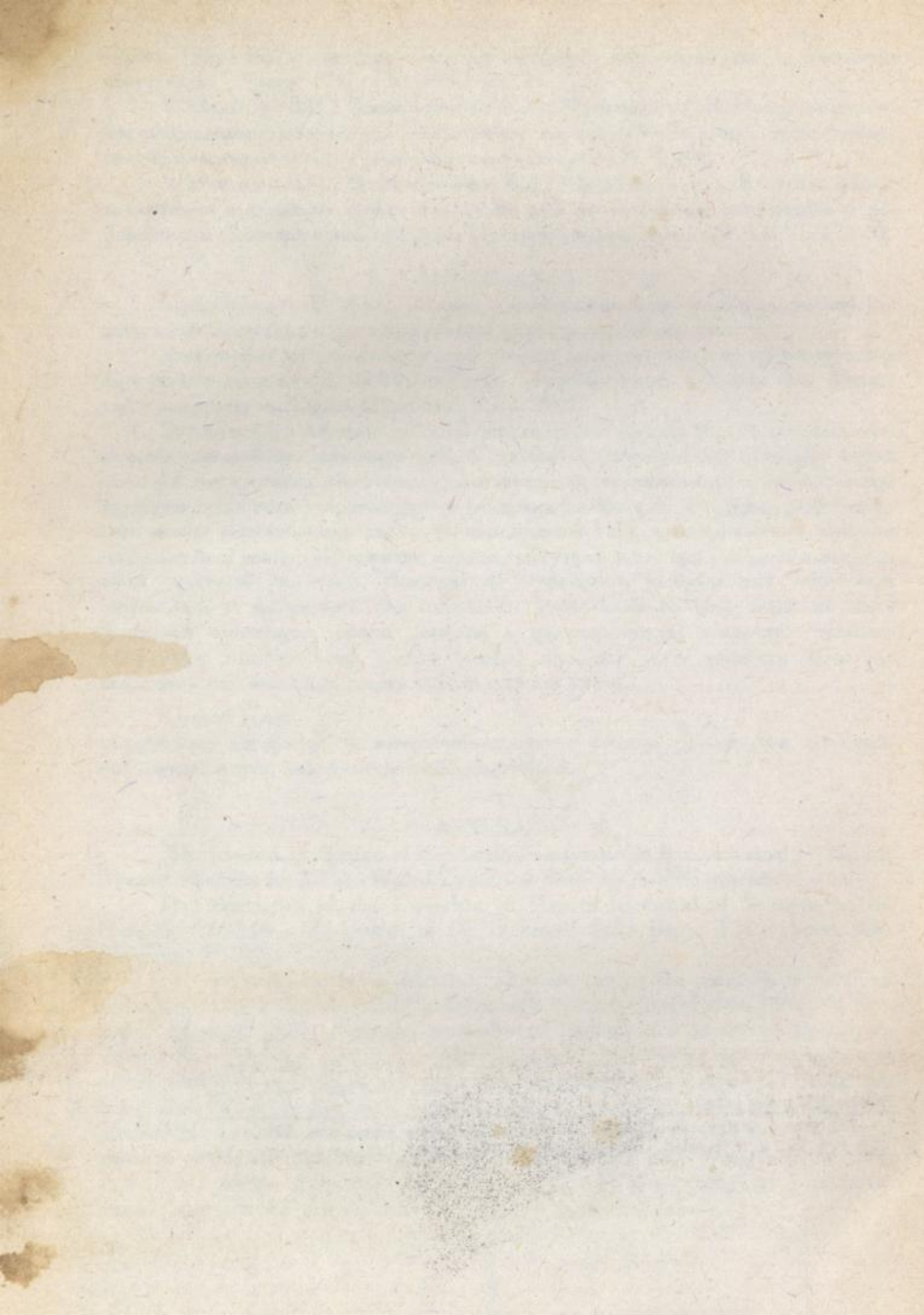
"The Method for Solving of the Axially-Nonsymmetric Nonisothermal Problem of Thermal Plasticity for a Thin-Walled Cylindrical Shell" by A.V.Musijachenko.

The dissertation of the Candidate of Physical-Mathematical Sciences on the Speciality 01.02.04 - Mechanics of the Deformed Solid Body, T.Shevchenko Kiev University, 1995.

The five works are being defended. They are treating the problems of numerical procedures for assessing the axially-nonsymmetric stressed-strained state (SSS) in thin-walled cylindrical shells at complex nonisothermal loadings with trajectories significantly differing from the linear ones. By using the proposed method, new problems have been solved relating to the SSS of cylindrical shells caused by nonsymmetrical heating, that being the case at welding with welds of different geometries. Investigated were the peculiarities of residual stress and strain distribution at welding by the linear weld, short welds of varying directions, at patch welding of a cylindrical shell. Numerically has been shown the existence of the region of weld's start (finish) when taking into account the rate of movement of a welding source at welding of cylindrical rings.

Підп. до друку 30.10.95. Формат 60x84/16. Пап. сес. № 2. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,16. Обл.-вид. арк. 0,96.
Тираж 100 прим. Зам. 5-294.

ІЗІ Ім. Е.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.
ПОД ІЕЗ Ім. Е.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.



4459/6

AV 33.351