

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ

На правах рукопису

ТАРАСЮК ВАСИЛЬ СТЕПАНОВИЧ

ОБЕРНЕНІ ОСЕСИМЕТРИЧНІ ЗАДАЧІ НЕЛІНІЙНОГО  
ДЕФОРМУВАННЯ ОРТОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК

01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1993

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті механіки АН України

Науковий керівник - академік АН України,  
доктор технічних наук,  
професор Гузь О.М.

Науковий консультант - доктор технічних наук,  
професор Чернишенко І.С.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор Василенко А.Т.;  
кандидат технічних наук, с.н.с.  
Єрмішев В.М.

Провідна організація: Київський автомобільно-дорожній  
інститут

Захист відбудеться "29" березня 1994 р. о 10 годині  
на засіданні спеціалізованої ради К 016.49.01 в Інституті  
механіки АН України (252057, Київ-57, вул.Нестерова, 3).

Із дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці  
Інституту механіки АН України.

Автореферат розісланий "25" лютого 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, професор

  
В.М.Назаренко

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00802349 (Q)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена теоретичному дослідженню формозміни циліндричних оболонок, виготовлених із нелінійно-пружних ортотропних композитних матеріалів, шляхом чисельного розв'язку геометрично і фізично нелінійних обернених задач, що полягають у знаходженні параметрів навантаження, яке приводить до утворення оболонки нової наперед заданої форми.

Актуальність проблеми. Проблеми сучасного машинобудування, проектування та виготовлення міцних та надійних несучих об'єктів вимагають дослідження процесів, пов'язаних з формоутворенням елементів конструкцій, довантаженням до заданої форми прецизійних пристроїв, отриманням якісної та кількісної інформації щодо причин, які обумовлюють нову форму. Успішне проведення досліджень вказаних процесів приводить до розгляду обернених задач формозміни.

Стосовно тонкостінних елементів конструкцій (пластин, оболонок), виготовлених з лінійно-пружних ізотропних та анізотропних, а також ідеальнопластичних ізотропних матеріалів, методи розв'язку обернених задач (оптимізації конструкцій, контактної взаємодії тіл, штампування, вигинання тощо) достатньо розроблені. Серед них існують наближені підходи з використанням ряду гіпотез та припущень, що дозволяють оцінити енергетичні та силові параметри розглядуваних процесів.

Широке використання сучасних композитних матеріалів, необхідність врахування їх реальних властивостей (ортотропії, стисливості, нелінійності) та особливостей деформування (гнучкості), пов'язаних з процесами формозміни, вимагає нових постановок задач, розробки ефективних методів їх розв'язку, створення на їх основі пакетів прикладних програм для ЕОМ з використанням відповідних нелінійних теорій.

Метою даної роботи є розробка методики та визначення величин інтенсивності навантаження і дослідження напружено-деформованого стану при формозміні гнучких ортотропних циліндричних оболонок, виготовлених із нелінійно-пружних композитних матеріалів.

Наукова новизна роботи полягає в таких основних положен-

нях, що виносяться на захист:

1) постановка фізично і геометрично нелінійних обернених задач для тонких осесиметричних циліндричних оболонок із нелінійно-пружних ортотропних композитних матеріалів;

2) розробка методики чисельного розв'язку нелінійних задач вказаного класу з використанням запропонованої ефективної схеми застосування методів послідовних наближень в поєднанні з варіаційно-різницеvim методом, побудова алгоритму і його програмна реалізація на ЕОМ;

3) розв'язок нових обернених задач нелінійного деформування ортотропних циліндричних оболонок в оболонки обертання конкретної форми (конічні, параболічні);

4) дослідження впливу нелінійних властивостей та ортотропії матеріалу на величини інтенсивності навантаження та напружено-деформований стан гнучких оболонок із виявленням механічних ефектів.

Достовірність отриманих у роботі результатів підтверджується: математичною коректністю постановки нелінійних обернених задач і виведення розв'язувальних рівнянь; практичною перевіркою збіжності ітераційних процесів при розв'язку конкретних нелінійних задач; результатами тестування методики шляхом розв'язку розглянутих задач у спрощеній постановці; а також узгодженням результатів розрахунків оберненої задачі стосовно збільшення радіуса циліндричної нелінійно-пружної ортотропної оболонки із узгодженими з оберненою задачею відомими даними розв'язку прямої задачі.

Практична цінність роботи полягає в реалізації розробленої методики розв'язку нелінійних задач вказаного класу у вигляді програм для ЕОМ, включаючи ПЕОМ, що дозволяє дослідити напружено-деформований стан нелінійно-пружних ортотропних оболонок та визначити величини інтенсивності навантаження у широкому діапазоні зміни їх геометричних і фізико-механічних властивостей. Розроблена методика, складені програми та результати числових розрахунків можуть бути використані в інженерній практиці при проектуванні та виготовленні шляхом формозміни типових тонкостінних оболонкових конструкцій з оцінкою їх міцності.

Основні результати, що отримані в дисертаційній роботі, ввійшли у звіти з науково-дослідних робіт Інституту механіки АН України.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались: на семінарах відділу динаміки та стійкості суцільних середовищ Інституту механіки АН України (1990-1993 р.); на семінарі "Механіка композитних і неоднорідних матеріалів" Інституту механіки АН України; на XVII, XVIII наукових конференціях молодих вчених Інституту механіки АН України (1992-1993 р.р.).

Виконані дослідження відповідають планам наукових досліджень із природничих наук АН України на 1990-1993 р.р. (проблема 1.10.2 - механіка деформівного твердого тіла) і використані у звітах з науково-дослідних робіт Інституту механіки АН України (тема № 218 "Розробка принципів конструювання та методів розрахунку конструкцій із композитних матеріалів при нелінійному деформуванні", № д.р. 019334011269; проект № 1/228 "Оболонка").

Публікації. Основні результати досліджень по темі дисертації відображені в роботах [1-3].

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, трьох глав, висновку та списку літератури, що включає 116 найменувань літературних джерел. Загальний об'єм дисертації становить 102 сторінки.

Автор висловлює глибоку подяку науковому керівникові академіку АН України Олександрові Миколайовичу Гузю, а також доктору технічних наук, професору Іванові Семеновичу Чернишенку та кандидату фізико-математичних наук Володимирові Ананійовичу Максимюку за цінні поради, консультації та постійну увагу при виконанні даної роботи.

## ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота складається із вступу, трьох глав, висновку і списку літератури.

У вступі дано огляд робіт із теоретичних, експериментальних і прикладних аспектів проблеми, розкрито актуальність і

важливість розробки методики розв'язку геометрично і фізично нелінійних обернених задач формозміни тонких ортотропних оболонок, поставлена мета дисертаційної роботи, коротко викладені основні наукові положення, що виносяться на захист та зміст роботи за главами.

Слід відзначити, що процеси формоутворення (штамбування) елементів конструкцій із ізотропних ідеальнопластичних матеріалів, що зводяться до розв'язку обернених технологічних задач термопластичності, достатньо висвітлені в літературі. Результати досліджень в цьому напрямі наведені в монографіях Аліфанова А.В., Захаревича Л.В., Макушка Є.М. Оленіна Л.Д.; Попова Є.А.; Тулупова С.А., Гуна Г.С., Онісківа В.Д., Курдюнова В.А. тощо, та статтях Алієва І.С., Савченка О.К.; Герасимова А.В., Гуськова В.А.; Горбунова В.А., Бодукова Н.М.; Даниліна Г.А., Зацепіна С.Б.; Каплунова Б.Г., Фельде А.А.; Чумадіна А.С., Chu E., Duncan J., Legait J., Sowerby R., Zorn H. та інших.

Питанням оптимізації та раціонального проектування елементів тонкостінних конструкцій з використанням певних критеріїв (мінімум ваги чи вартості, рівномірності, тощо), які пов'язані з розглядом обернених задач теорії пластин та оболонок із ізотропних та анізотропних матеріалів, присвячені роботи Василенка А.Т., Голушка С.К., Колчанової Є.А., Литвинова В.Г., Малкова В.П., Медведева М.Г., Немировського Ю.В., Угодчикова А.Г. та інших.

Проблема формозміни та формоутворення конструктивних елементів, виготовлених із шаруватих ізотропних або композитних матеріалів, розглянута в обмеженій кількості робіт авторів Аришенського Ю.М., Боголюбова В.С., Бурлакова А.В., Ганієва Н.С., Деля Г.Д., Львова Г.І., Одінга С.С., Кім J.K., Лі Z.N., Owen D.R.J., Thomson P.P. та інших.

Розробка методів та розв'язок прямих і обернених задач в нелінійних постановках з використанням чисельних методів та сучасних ЕОМ дані в роботах Абовського Н.П., Гоцуляка Є.О., Григоренка Я.М., Гуляєва В.І., Єрмішева В.М., Корнішина М.С., Львова Г.І., Піскунова В.Г., Рассказова О.О., Сахарова О.С., Столярова М.М. та інших.

Із аналізу літератури стосовно даної проблеми можна зро-

бити висновок, що до цього часу недостатньо розроблені методи розрахунку неметрично і фізично нелінійних обернених задач формозміни осесиметричних циліндричних оболонок із нелінійно-пружних композитних матеріалів.

У першій главі дана постановка фізично і геометрично нелінійних обернених осесиметричних задач деформування циліндричних ортотропних оболонок обертання. Приведені основні геометричні співвідношення теорії тонких оболонок у квадратичному наближенні, а також нелінійні фізичні співвідношення між напруженнями і деформаціями теорії нелінійної пружності та пластичності анізотропних середовищ.

Розглянута тонка кругова циліндрична оболонка, виготовлена із ортотропного композитного матеріалу (рис.1а), що віднесена до спряженої криволінійної системи координат  $(\alpha, \beta, \gamma)$ . Вона знаходиться під дією певної системи поверхневих та контурних сил, від яких в оболонці, що приймає задану конфігурацію, проявляються нелінійні деформації, пов'язані зі зміною форми, і нелінійні властивості матеріалу. Прийнято, що бажана форма серединної поверхні у деформованому стані задається неявним рівнянням  $f(\alpha, \gamma) = 0$ . Якщо середина поверхня заготовки прийме задану форму, то координати вектора переміщення будуть задовольняти рівняння

$$f(\alpha + u, w) = 0, \quad (1)$$

яке задає кінематичну умову (рис.1б) процесу формозміни.

При цьому приймаються такі припущення:

- дотичні складові навантаження дорівнюють нулеві;
- відносні видовження є малими і зміною товщини оболонки в процесі деформування можна знехтувати;
- нормальні переміщення можуть значно перевищувати товщину оболонки, але квадрати кутів повороту малі у порівнянні з одиницею, що відповідає середньому згину;
- процес формозміни є монотонним.

За рідкісним винятком умова (1), що забезпечує задану зміну форми оболонки, є нелінійним рівнянням стосовно компонентів вектора переміщення. При виготовленні оболонок основний вклад в зміну форми вносить нормальне переміщення  $w$ . В межах прийнятих припущень стосовно величин деформацій і кутів пово-

роту нормальне переміщення  $w$  може значно перевищувати дотичну складову  $u$ . Це дозволяє ефективно лінеаризувати умову (1) методом послідовних наближень і задавати на кожній ітерації нормальне переміщення як відому функцію. Для  $n$ -го наближення маємо

$$w^n = w(\alpha, u^{n-1}). \quad (2)$$

Необхідно визначити величини зовнішніх навантажень на оболонку та напружено-деформований стан (НДС).

На краях оболонки реалізуються граничні умови, які часто зустрічаються в інженерній практиці.

Для виведення розв'язувальних диференціальних рівнянь використані геометричні співвідношення нелінійної теорії гнучких тонких оболонок, що базуються на застосуванні гіпотез Кірхгофа-Лява.

Відповідно до прийнятої постановки задач вирази для компонентів тензора деформації у випадку довільних тонких оболонок обертання мають вигляд

$$e_\alpha = \varepsilon_\alpha + \gamma x_\alpha \quad (\alpha \rightarrow \beta), \quad (3)$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{1}{A} u_{,\alpha} + k_\alpha w + \frac{1}{2} \theta^2, \quad \varepsilon_\beta = \frac{B}{AB} u + k_\beta w; \quad (4)$$

$$x_\alpha = \frac{1}{A} \theta_{,\alpha}; \quad x_\beta = \frac{1}{AB} B_{,\alpha} \theta; \quad \theta = k_\alpha w - \frac{1}{A} w_{,\alpha}.$$

У формулах (3)-(4)  $A$ ,  $B$  та  $k_\alpha$ ,  $k_\beta$  - коефіцієнти квадратичної форми та головні кривизни поверхні зведення, для циліндричної оболонки -  $A = 1$ ,  $B = R$ ,  $k_\alpha = 0$ ,  $k_\beta = R^{-1}$ .

Фізичні співвідношення, прийняті згідно із запропонованою В.А.Ломакіним теорією нелінійної пружності та пластичності анізотропних середовищ, у випадку плоского напруженого стану мають вигляд

$$de_\alpha = \frac{1}{E_\alpha} d\sigma_\alpha - \frac{\nu_\alpha}{E_\alpha} d\sigma_\beta + w'_s \frac{df}{2f} (q_{\alpha\alpha} \sigma_\alpha + q_{\alpha\beta} \sigma_\beta) \quad (\alpha \rightleftharpoons \beta) \quad (5)$$

де  $E_s(\alpha, \gamma)$ ,  $\nu_s(\alpha, \gamma)$  - модулі пружності та коефіцієнти попереч-

ної деформації ортотропного матеріалу;  $q_{\alpha}, q_{\beta}, q_{\alpha\beta} = q_{\beta\alpha}$  - компоненти тензора, що враховують анізотропію його нелінійних властивостей;  $W_S(f)$  - функція зміщення, що залежить від квадратичної форми напружень

$$f = \frac{1}{2} q_{\alpha} \sigma_{\alpha}^2 + \frac{1}{2} q_{\beta} \sigma_{\beta}^2 + q_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha} \sigma_{\beta}, \quad (6)$$

$i$  є роботою, що виконує тіло на нелінійних деформаціях, причому  $W_S = 0$  при  $df < 0$ .

Параметри анізотропії та функцію зміщення нелінійного ортотропного матеріалу визначають на основі діаграм деформування; для склопластика ПН-1, Т-1 вони подані на рис. 2, криві 1, 2 і 3 відповідають розтягу вздовж осей  $\alpha, \beta$  та під кутом  $45^{\circ}$  до них. Постійні даного нелінійно - пружного матеріалу приймають значення  $E_{\alpha} = 15$  ГПа,  $E_{\beta} = 12$  ГПа,  $\nu_{\alpha} = 0,12$ ;  $q_{\alpha} = 2$ ,  $q_{\beta} = 3,14$ ,  $q_{\alpha\beta} = -0,24$ .

При цьому функція зміщення добре апроксимувалась залежністю

$$W_S = \alpha[(f/f_S)^n - 1] \quad (7)$$

з параметрами  $\alpha = 1460$  Па;  $n = 1,97$ ;  $f_S = 1560$  (МПа)<sup>2</sup>.

Фізичні рівняння у випадку зміни компонентів напружень пропорційно одному параметру приймають вигляд скінченних співвідношень між напруженнями та деформаціями

$$e_{\alpha} = (\sigma_{\alpha} - \nu_{\alpha} \sigma_{\beta}) / E_{\alpha} + \psi(q_{\alpha} \sigma_{\alpha} + q_{\alpha\beta} \sigma_{\beta}) \quad (\alpha \rightleftharpoons \beta), \quad (8)$$

де

$$\psi = \frac{1}{2\sqrt{f}} \int_{f_S}^f \frac{W'_S}{\sqrt{f}} df = \frac{W_S}{2f} + \frac{1}{4\sqrt{f}} \int_{f_S}^f \frac{W_S}{f\sqrt{f}} df; \quad (9)$$

$f_S$  - значення величини  $f$ , вище якого виявляються нелінійні властивості матеріалу. За допомогою методу Ньютона рівняння (8) розв'язуються чисельно відносно напружень:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha}(e_{\alpha}, e_{\beta}) \quad (\alpha \rightleftharpoons \beta). \quad (10)$$

Відмітимо, що із рівнянь (8) випливають фізичні співвідношення деформаційної теорії пластичності для нестисливого ізотропного матеріалу, якщо прийняти  $E_{\alpha} = E_{\beta} = E$ ;  $\nu_{\alpha} = \nu_{\beta} = \nu = 0,5$ ;  $q_{\alpha} =$

$q_\beta = 2; q_{\alpha\beta} = -1; \psi = \omega_1 [2E(1-\omega_1)]^{-1}$ , де  $\omega_1$  - функція пластичності А.А.Ількіна. При  $\psi = 0$  із рівнянь (8) одержимо співвідношення пружності для лінійно-пружного ортотропного матеріалу.

Приведені основні граничні умови, що часто зустрічаються в інженерній практиці.

У другій главі викладена методика чисельного розв'язку розглядуваних нелінійних обернених задач, яка базується на спільному використанні варіаційно-різницевого методу та методу послідовних наближень.

При цьому використовується варіаційний принцип Лагранжа  $\delta\Pi = \delta(E-A) = 0$ , де  $\Pi$  - повна енергія,  $E$  - потенціальна енергія деформації оболонки,  $A$  - робота зовнішніх поверхневих і крайових сил. Повні напруження, деформації, зусилля та моменти подаються у вигляді суми лінійних (залежних тільки від  $u$ ) і нелінійних (враховуючи і доданки залежні від  $w$ ) з індексами "0" та "\*" відповідно

$$\sigma_\alpha = \sigma_\alpha^0 + \sigma_\alpha^*, \quad (\sigma \rightarrow e, T, Q, M; \alpha \rightarrow \beta)$$

$$e_\alpha^0 = \epsilon_\alpha^0 + \gamma_\alpha^0, \quad e_\alpha^* = \epsilon_\alpha^* + \gamma_\alpha^*, \quad (11)$$

Варіація потенціальної енергії записується у вигляді

$$\delta E = \delta(E^0 + E^*),$$

де

$$E^0 = \frac{1}{2} \iint_S [T_\alpha^0 \epsilon_\alpha^0 + T_\beta^0 \epsilon_\beta^0 + M_\alpha^0 \chi_\alpha^0 + M_\beta^0 \chi_\beta^0] dS. \quad (12)$$

$$E^* = \iint_S [T_\alpha^* \epsilon_\alpha^0 + T_\beta^* \epsilon_\beta^0 + M_\alpha^* \chi_\alpha^0 + M_\beta^* \chi_\beta^0 + (T_\alpha \theta_\alpha)^* \theta_\alpha^0] dS.$$

Таким чином, після дискретизації задача зводиться до розгляду систем лінійних алгебраїчних рівнянь в  $n$ -му наближенні

$$\sum_j A_{1j} u_j^{n+1} = \Omega_1^n - g_1, \quad (j=1-1, 1, 1+1; i=\overline{1, k}; n=0, 1, \dots). \quad (13)$$

Тут  $A_{1j}; g_1$  - змінні коефіцієнти,  $\Omega_1$  - нелінійні члени, що обчислюються з врахуванням фізичної та геометричної нелінійностей (включаючи і доданки, залежні від  $w$ ).

Коефіцієнти системи (13) визначаються формулами:

$$A_{11-1} = -\frac{K_1(1-1/2)}{\lambda} \omega(1-1/2); \quad A_{11+1} = -\frac{K_1(1+1/2)}{\lambda} \omega(1+1/2)$$

$$A_{11} = \frac{1}{\lambda} \left[ K_1 \omega \right]_{1-1/2}^{1+1/2} - \frac{\lambda}{2} \left[ K_2 \omega \right]_{1-1/2}^{1+1/2} + \lambda K_3(1)\omega(1),$$

$$\Omega_1 = -\lambda(L_1 \omega) \Big|_1 + (L_2 \omega) \Big|_{1-1/2}^{1+1/2}. \quad (14)$$

Дано описання алгоритму та приводиться його блок-схема, вказані характеристики програми для ЕОМ. Програма складена на алгоритмічній мові ФОРТРАН із використанням принципів структурного та модульного програмування. Це дозволяє розв'язати широкий клас обернених задач для різних конкретних типів композитних оболонок. Алгоритм забезпечує отримання всіх компонент напружено-деформованого стану (переміщень, деформацій, зусиль, моментів та навантаження) у заданих точках вздовж меридіана та по товщині оболонки. Приділяється увага питанням точності та збіжності чисельного розв'язку. Виявлено раціональний спосіб врахування нелінійних факторів в процесі наближень. Так, геометрична нелінійність починає враховуватись на початку процесу, а фізична—в наступній ітерації, що прискорює збіжність ітераційного процесу.

Наводяться розв'язки ряду тестових задач та дається порівняння із результатами, що отримані чисельними методами у працях інших авторів. Як тестові розглянуті задачі: а) форма зміна ізотропної циліндричної оболонки в конічну (порівняння з відомими числовими результатами); б) нелінійне деформування ортотропної циліндричної оболонки в циліндричну більшого радіуса (порівняння узгоджених вхідних і вихідних даних оберненої та прямої задач).

Результати всестороннього тестування дозволили дати оцінку ефективності розробленої методики (алгоритму та програми) та можливості її застосування до розв'язку нових обернених задач.

У третій главі приведені результати розв'язку конкретних

нелінійних (лінійних) задач формозміни циліндричних оболонок в оболонки інших типів (конічного, параболічного).

Розглянуто формозміну циліндричної оболонки радіуса  $R$ , товщини  $h$ , довжини  $l$  ( $R/h=30\dots 50$ ,  $l/h=20\dots 100$ ) в кругову конічну оболонку під дією невідомої величини навантаження, при якому рівняння (2) має вигляд  $w=\varphi(\alpha+u)+w_0$ , де  $\varphi$  - кут конусності ( $\varphi = 0.01\dots 0.2$ ,  $w_0 = 0\dots h$ ). Матеріал оболонок - нелінійно-пружний склопластик ПН-1, Т-1 (рис.2). Розглянуто три варіанти закріплення країв ( $\alpha=0$ ,  $\alpha=l$ ) оболонки. Визначено напружено-деформований стан та величини зовнішнього навантаження (поверхневого тиску, крайових зусиль і моментів). Числові результати подані у вигляді графіків і таблиць. Деякі з них приведені у табл.1 та рис.3,4.

У табл.1 приведені максимальні значення компонент переміщень  $u, w$  та кільцеві напруження  $\sigma_\beta = \tilde{\sigma}_\beta \cdot 10^5$  Па на краю  $\alpha=l$  при розв'язку лінійних задач (ЛЗ) та нелінійних (ГН-геометричних, ФН-фізичних, N-номер варіанта задачі) в залежності від показника ортотропії ( $E^* = E_\alpha/E_\beta = 1.25; 0.8$ ) при таких значеннях  $R/h=30$ ,  $l/h=50$ ,  $w_0=0$ ,  $\varphi=0.05$  і граничних умовах  $u=0$  при  $\alpha=0$  та  $T=0$  при  $\alpha=l$ , кількості вузлових точок  $K=21$ . На рис.3 показана залежність величини зовнішнього навантаження  $\tilde{P}_\gamma = P_\gamma/E_\alpha \cdot 10^3$  від величини кута конусності  $\varphi$ . На рис.4 приводиться залежність напружень  $\sigma_\beta$  від величини нормального переміщення  $w$  при розв'язку лінійної задачі та з врахуванням обох нелінійностей (ГН). Виявлено, що для різних значень  $\alpha_1 \neq \alpha_2$  при виконанні умови  $w(\alpha_1) = w(\alpha_2)$  інші компоненти тензора деформацій і переміщень  $\epsilon_\alpha, \sigma_\alpha$  ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) у цих перерізах теж рівні.

На основі числових результатів для конічних оболонок вивчено вплив нелінійних геометричних та фізичних факторів як за окремого, так і спільного їх врахування на напружено-деформований стан та величини внутрішнього тиску.

Проведено розв'язок обернених задач формозміни циліндричної оболонки в оболонки параболічного типу з різною формою кривини меридіана, який задається формулами  $w = \varphi(\alpha+u)^2/l + w_0$ ,  $w = \varphi(l-(\alpha+u-l)^2/l) + w_0$ , що відповідає оболонкам від'ємної та додатної кривини. Прийнято, що у розглянутих оболонках діаметри відповідних країв ( $\alpha=0$ ,  $\alpha=l$ ) однакові.

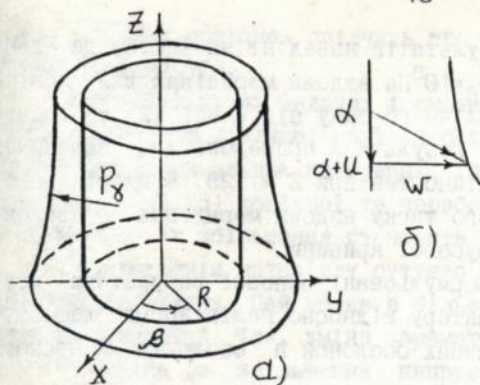


Рис.1

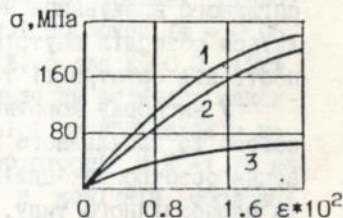


Рис.2

N	$E^*$	$-u/h$	$w/h$	$\tilde{\sigma}_\beta$
ЛЗ	1.25	.199	2.49	9960
ГН	1.25	.261	2.49	9948
ФН	1.25	.176	2.49	3199
ГФН	1.25	.239	2.49	3197
ЛЗ	0.8	.249	2.49	12440
ГФН	0.8	.311	2.48	4273

Табл.1

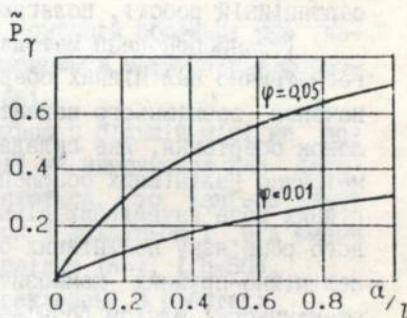


Рис.3

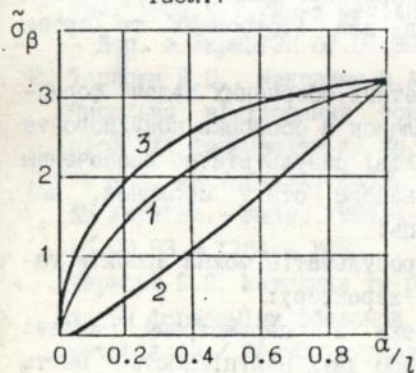


Рис.5

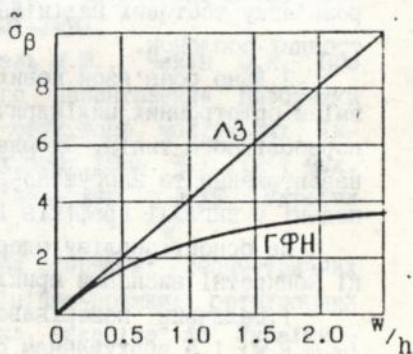


Рис.4

Деякі з отриманих результатів наведені на рис.5, де дана залежність напруження  $\sigma_{\rho} = \tilde{\sigma}_{\rho} * 10^8 \text{Па}$  вздовж меридіана для конічної оболонки (1) та параболічного типу від'ємної (2) та додатньої (3) гаусової кривини. Результати приведені для задач за спільного врахування нелінійностей при  $E^* = 1.25$ . В главі наводиться розподіл внутрішнього тиску вздовж меридіана в залежності від ортотропії та гаусової кривини.

У висновку коротко сформульовані основні результати наукового та прикладного характеру відносно нелінійного деформування ортотропних циліндричних оболонок в оболонки конусного та параболічного типу.

Таким чином, основні наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, полягають в такому:

1. Запропонована методика чисельного розв'язку фізично і геометрично нелінійних обернених осесиметричних задач та визначення зовнішнього навантаження для тонких ортотропних оболонок обертання, яке складається із: постановки фізично і геометрично нелінійних обернених задач; виведення системи нелінійних розв'язувальних рівнянь; застосування методів наближеного розв'язку нелінійних обернених задач стосовно оболонок із нелінійно-пружних композитних матеріалів, підтвердження їх ефективності шляхом розв'язку ряду тестових задач.

2. На основі даної методики розроблено алгоритм та складена програма для чисельного розв'язку розглядуваного класу задач на ЕОМ. Ефективність програми проілюстрована на прикладах розв'язку тестових нелінійних задач для ізотропних та ортотропних оболонок.

3. Дано розв'язок нових конкретних обернених задач форми зміни ортотропних циліндричних оболонок в оболонки конусного та параболічного типів. Одержані числові результати по визначенню навантаження та напружено-деформованого стану оболонок, які подані у вигляді графіків і таблиць.

На основі аналізу одержаних результатів можна зробити такі конкретні висновки прикладного характеру:

1. Величини поверхневого тиску з параметрами задачі  $(\alpha, \varphi, R, w)$  і з врахуванням однієї або двох нелінійностей мають нерівномірний характер розподілу по меридіану оболонок. Формо-

зміна окремих оболонок свідчить про необхідність прикладання крайових моментів.

2. У розглянутих задачах формозміни оболонок неврахування геометричної та фізичної нелінійностей приводить до значного завищення максимальних напружень. Так, для ортотропних рівношироких ( $E^* = 1.25$ ) конічної та параболічної оболонок ( $\varphi = 0.05$ ,  $\alpha = 1$ ,  $l/h = 50$ ) їх збільшення становить  $\sim 211\%$ , а для  $E^* = 0.8$   $\sim 192\%$ .

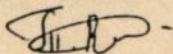
3. Ортотропія матеріалу суттєво впливає на величини максимальних напружень. Цей вплив в більшій мірі проявляється в нелінійних задачах. Так, зміна параметру ортотропії з  $E^* = 1.25$  на  $E^* = 0.8$  веде до збільшення напружень в конічній оболонці ( $\varphi = 0.05$ ,  $\alpha = 1$ ,  $l/h = 50$ ) на 25% в лінійній і 34% в нелінійних задачах.

4. Для різних значень  $\alpha_1 \neq \alpha_2$  у конічній оболонці при виконанні умови  $w(\alpha_1) = w(\alpha_2)$  інші компоненти напружено-деформованого стану у цих перерізах теж рівні.

5. Геометрична нелінійність впливає в більшій мірі на деформований, ніж напружений стан. Тоді як напруження для параболічних оболонок практично не змінюються, то тангенціальні переміщення збільшуються для оболонок з додатньою і від'ємною гаусовою кривиною на 31% і 89% відповідно ( $\alpha = 1$ ,  $l/h = 50$ ).

Основні результати дисертації викладені в роботах:

1. Тарасюк В.С. О решении обратных задач деформирования пластин из нелинейно-упругих композитных материалов // Тр. XVII науч. конф. мол. ученых Ин-та мех. АН Украины, Київ, 19-22 мая, 1992. Ч.1. /Ин-т мех. АН Украины.- Київ, 1992.- С.136-140. - Деп. в УкрИНТЭИ 07.07.92, № 1021-Ук92.
2. Тарасюк В.С., Максимюк В.А., Дишель М.Ш., Чекін О.Н. Про чисельне відтворення зовнішнього навантаження пластинки після її формозміни // Пр. XVIII наук. конф. мол. учених Ін-ту мех. АН України, Київ, 18-21 травня, 1993. Ч.1. /Ин-т мех. АН України.- Київ, 1993.- С.127-131.- Деп. в ДНТБ України 16.08.93 № 1764 - Ук93.
3. Тарасюк В.С. Методика та розв'язок обернених осесиметричних задач формозміни оболонок із нелінійно-пружних ортотропних матеріалів / Редкол. журналу "Прикл. механіка" АН України.- Київ, 1993.- 11 с.- Деп. в ДНТБ України 14.10.93, № 1987-Ук93.



ЛНБ ім. В. Стеф.  
АН Украї

AB 29.951  
**AB 29.951**

НПО "КАМЕТ" Тираж 100 Заказ 128/1