

**Міністерство освіти України**

**Тернопільський приладобудівний інститут**

**імені Івана Пулюя**

*На правах рукопису*

**Д я ч у к**

**Степан Федорович**

**Моделювання та оптимізація формоутворення  
тонкостінних елементів конструкцій  
методом пружно-пластичного деформування**

05.02.07 - механіка деформівного твердого тіла

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль - 1996

39.5

№. 36.401

Робота виконана на кафедрі  
Тернопільського приладострої

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00757292 (W)

- Наукові керівники: -доктор фізико-математичних наук, професор  
**Шаблій Олег Миколайович**  
-кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Михайлишин Михайло Стахович**
- Офіційні опоненти: -доктор фізико-математичних наук, професор  
**Осадчук Василь Антонович**  
-кандидат технічних наук, доцент  
**Подкозьін Вячеслав Юрійович**

Провіона організація - Львівський державний університет імені Івана Франка

Захист відбудеться «10» січня 1997 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К12.02.02 в Тернопільському приладобудівному інституті імені Івана Пулюя за адресою: 282001, м.Тернопіль, вул.Руська,56.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотечі ТПІ ім.Івана Пулюя. (м.Тернопіль, вул.Руська,56).

Відгук на автореферат просимо надсилати за адресою: 282001, м.Тернопіль, вул. Руська 56, Тернопільський приладобудівний інститут імені Івана Пулюя, вченому секретарю спеціалізованої вченої ради К 12.02.02.

Автореферат розіслано «10» грудня 1996 року.

Вчений секретар спеціалізованої ради,  
кандидат технічних наук

 М.Р.Петрик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. Оцінюючи традиційні методи розрахунку та проектування процесів формоутворення тонкостінних елементів конструкцій, доводиться константувати в багатьох випадках їх відставання від вимог сучасного виробництва та невідповідність рівню забезпеченості підприємств обчислювальною технікою. В розрахунках формоутворення тонкостінних елементів використовують головним чином табличні дані та емпіричні залежності. Такі розрахунки в більшості випадків є наближеними, що породжує прийняття неоптимальних чи невірних рішень при оцінці степені формозміни заготовки, врахуванні пружного пружинення і т.д.

Наближені методи технологічних розрахунків стали в свій час загальноприйнятими, тому що інші, більш точні методи, були дуже трудомісткими, вимагали виконання великого об'єму обчислень. В зв'язку з широким впровадженням на виробництві засобів електронно-обчислювальної техніки, необхідно переходити до використання в повсякденній інженерній діяльності складних теоретичних розрахунків. Звичайно, в деяких випадках використання наближених розрахунків оправдане, наприклад, при виборі обладнання для виконання операції, але якщо необхідно визначити напруження в заготовці з метою відповіді на питання міцності в процесі виготовлення, чи проаналізувати вплив історії навантаження на протікання процесу, то потрібно використовувати більш точні розрахунки. Це особливо важливо в тих випадках, де повинна бути досягнута велика точність виготовлення, як наприклад, при виготовленні та експлуатації дзеркал параболічних антен космічного та супутникового зв'язку. Великі проблеми виникають в процесі експлуатації антен великих діаметрів в зв'язку з зміною їх форми за рахунок власної ваги, природніх факторів та інше. Отже, розробка уточнених математичних моделей деформування, дослідження напружено-деформованого стану з метою розрахунку та оптимізації процесу формоутворення тонкостінних елементів конструкцій - актуальна тема.

### Метою роботи є:

- ♦ Забезпечення проектування засобів формоутворення тонкостінних елементів конструкцій на основі математичного моделювання і оптимізації процесів пружнопластичного деформування з врахуванням значної зміни їх геометрії.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

### Наукова новизна роботи:

- ◆ Розроблена уточнена математична модель формування тонкостінних елементів конструкцій типу осесиметричних оболонок обертання з врахуванням значної зміни геометрії конструкції в процесі деформування на основі деформаційної теорії пластичності та теорії течіння з ізотропним зміцненням;
- ◆ Розроблений алгоритм розв'язування геометрично та фізично нелінійних крайових задачі виникають в процесі формування;
- ◆ Розроблена математична модель знаходження поля зовнішнього навантаження, яке забезпечує задану форму осесиметричної тонкостінної оболонки на кінець процесу навантаження та задану залишкову форму після розвантаження;
- ◆ Розроблений алгоритм розв'язування задачі знаходження оптимального зовнішнього навантаження з метою забезпечення заданої форми серединної поверхні тонкостінної оболонки.

### Вірогідність отриманих результатів забезпечується :

- ◆ узгодженістю числових результатів з отриманими з експерименту та з приведеними в літературі для деяких тестових задач;
- ◆ фізичною вірогідністю отриманих результатів;
- ◆ для задач оптимізації правильністю отриманого результату після розв'язування прямої задачі з знайденим оптимальним навантаженням.

### Практична значимість:

Розроблено математичні моделі, алгоритми та програми числового моделювання осесиметричного пружно-пластичного деформування тонкостінних елементів конструкцій при значних змінах геометрії з використанням деформаційної теорії пластичності та теорії течіння. Розроблений набір програм може бути використаний як для розрахунків при розробці технологічного процесу виготовлення так і для аналізу НДС в осесиметричних оболонкових конструкціях, які працюють як в пружній так і в пластичній області. Програми та алгоритми можуть бути використані в різних галузях народного господарства. Відкритість структури розробленого набору прикладних програм дозволить користувачу наростити його за рахунок підключення своїх програм та процедур. Програми можуть бути використані як програмне забезпечення САПР даного напрямку.

Самостійне значення мають результати розв'язків деяких задач з врахуванням значної зміни геометрії в процесі деформування. Вони можуть бути використані в проектно-конструкторській практиці, для керування формою дзеркала антени великого діаметру, а також для перевірки результатів отриманих іншими методами.

Розроблена методика числового моделювання та дослідження реального технологічного процесу виготовлення дзеркал параболічних антен супутникового телебачення і зв'язку.

Впровадження: Результати роботи передані у вигляді набору програм та методики моделювання для використання на Тернопільський завод «Сатурн», МП «Прилант» при ТПП ім. Івана Пулюя.

#### Апробація роботи:

Основні результати дисертаційної роботи доповідались на 3-й Всесоюзній конференція "Механіка неоднорідних структур", (м. Львів, 17-19.09.91р); 1-й та 2-й науково-технічних конференціях Тернопільського приладобудівного інституту імені Івана Пулюя. (м. Тернопіль, 1993, 1994р.), 1-му Міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків. (м. Львів, 18-20.05 93р); 4-й міжнародній конференції "Механіка неоднорідних структур", (м. Тернопіль, 19-22 09.95р).

В цілому робота розглядалась на семінарі кафедри математичного моделювання та механіки, об'єднаному семінарі кафедр математичного моделювання і механіки, технічної механіки та біомедичних систем та апаратів, та на кваліфікаційному семінарі в ТПП імені Івана Пулюя.

#### Публікації:

За темою дисертації опубліковано 8 робіт.

#### Структура та обсяг роботи:

Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг роботи складає 167 сторінок машинописного тексту в тому числі: 22 рисунки, 9 таблиць, списку літератури із 136 найменувань та додатків.

#### Основний зміст роботи:

У вступі обгрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, розкрита теоретична та практична важливість роботи.

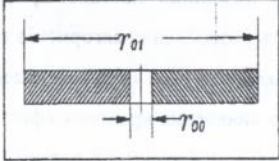
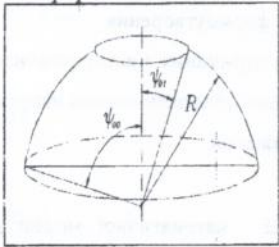
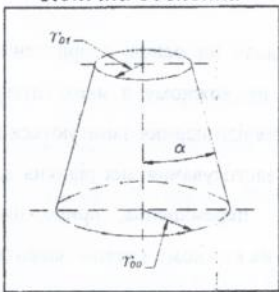
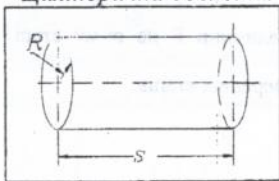
У першому розділі проведено короткий огляд досліджень в області технологічного формоутворення тонкостінних елементів конструкцій і розрахунку оболонкових конструкцій.

Відмічено великий внесок в теорію розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) тонкостінних оболонкових конструкцій українських вчених Я.М.Григоренка, Ю.Н.Шевченка, І.В.Прохоренка, О.М.Гузя, І.С.Чернишенка, А.П.Мукоєда, О.К.Овлякулієва, Л.В.Мольченка, Н.Н. Крюкова, А.Т.Василенка, І.А.Цурпала та інших.

Наукову базу основних технологічних методів формоутворення складає теорія пластичності у всіх її різновидах. Основні положення технології формоутворення тонкостінних елементів конструкцій методом пружно-пластичного деформування розроблені такими вченими як С.І.Губкін, І.М.Павлов, М.Л.Перлін, В.С.Смирнов, К.Н.Шевченко, Є.О.Попов, А.Г.Овчинников, Н.П.Громов та іншими. Теоретичний розрахунок конкретного процесу зводиться до складання відповідної системи рівнянь та їх розв'язку. Великий вклад в розробку методів оптимізації формоутворення внесли такі вчені як Ю.Г.Стоян, Л.Б.Белякова, Е.А.Мухачов, Г.П. Тетерін та інші.

У другому розділі, взявши за основу геометрично нелінійні в квадратичному наближенні рівняння рівноваги оболонки та геометричні співвідношення для тонкої оболонки обертання з довільною формою меридіану, отримані математичні моделі пружнопластичного деформування з використанням деформаційної теорії пластичності та теорії течіння при ізотропному зміцненні. Згідно запропонованих математичних моделей розроблено алгоритми та програми розв'язування задач осесиметричного деформування оболонок обертання в фізично та геометрично нелінійній постановці. Для лінеаризації фізичної нелінійності використано метод змінних параметрів пружності, а для лінеаризації геометричної - метод Ньютона-Канторовича. Лінійні крайові задачі, що виникають в кожному наближенні, розв'язуються стійким числовим методом дискретної ортогоналізації С.К.Годунова. Інтегрування між точками ортогоналізації здійснюється методом Рунге-Кутта четвертого порядку.

Математичні моделі та програми можуть використовуватися для моделювання процесів формоутворення тонкостінних осесиметричних конструкцій із заготовок у вигляді будь-яких оболонок обертання, основні з яких і відповідні головні радіуси кривизн приведені в таблиці.

№ п/п	Тип оболонки	Розрахункові формули
1.	<p style="text-align: center;"><i>Кругла пластина</i></p> 	$r_0 = S_0 + r_{00};$ $Z_0 = 0; \quad \varphi_0 = 0;$ $\frac{1}{\rho_{10}} = \frac{1}{\rho_{20}} = 0;$ $0 \leq S_0 \leq S_{01};$ $S_{01} = r_{01} - r_{00}.$
2.	<p style="text-align: center;"><i>Сферична оболонка</i></p> 	$\rho_{10} = \rho_{20} = R; \quad S_m = (\varphi_{01} - \varphi_{00})R;$ $r_0 = R \sin \left( \frac{S_0}{R} + \varphi_{00} \right);$ $Z_0 = R \left[ \cos \varphi_{00} - \cos \left( \frac{S_0}{R} + \varphi_{00} \right) \right];$ $\varphi_0 = \varphi_{00} + \frac{S_0}{R}; \quad 0 \leq S_0 \leq S_m.$
3	<p style="text-align: center;"><i>Конічна оболонка</i></p> 	$\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha;$ $r_0 = r_{00} + S_0 \sin \alpha;$ $Z_0 = S_0 \cos \alpha;$ $\frac{1}{\rho_{10}} = 0; \quad \rho_{20} = \frac{r_0}{\cos \alpha};$ $0 \leq S_0 \leq S_{01};$ $S_{01} = \frac{r_{01} - r_{00}}{\sin \alpha},$
4	<p style="text-align: center;"><i>Циліндрична оболонка</i></p> 	$\varphi_0 = \frac{\pi}{2}; \quad r_0 = R;$ $Z_0 = S_0; \quad \frac{1}{\rho_{10}} = 0;$ $\rho_{20} = r_0 = R; \quad 0 \leq S_0 \leq S_{01}.$

Використавши розроблені програми, знайдено розв'язки ряду задач пружнопластичного деформування круглої пластини під дією рівномірно розподіленого тиску для різних умов закріплення. Отримані розв'язки співпадають з відомими розв'язками аналогічних задач пружнопластичного деформування в геометрично лінійній постановці і чисто пружного деформування в геометрично нелінійній постановці, що говорить про адекватність математичної моделі і працездатність розроблених алгоритмів та програм.

Проаналізовано особливості реалізації алгоритму на ЕОМ. Знайдено оптимальний вибір точок ортогоналізації з метою найкращого виявлення крайових ефектів. Встановлено, що з точки зору збіжності послідовних наближень найкращим є варіант, коли уточнення фізичної нелінійності здійснюється у внутрішньому циклі по відношенню до уточнення геометричної нелінійності, яка проводиться у зовнішньому циклі. Запропоновані алгоритми використані для розрахунку технологічних задач формоутворення.

Здійснено аналіз і порівняння результатів отриманих з використанням деформаційної теорії пластичності і теорії течіння. Проаналізовано поля залишкових напружень деформацій та переміщень в конструкції після зняття навантаження.

Третій розділ присвячений розробці математичної моделі формоутворення тонкостінних елементів конструкцій з послідовним уточненням геометрії в процесі деформування.

При розв'язуванні пружнопластичних задач на основі теорії течіння весь процес навантаження розбивається на окремі етапи, на кожному з яких інтегруються фізичні залежності. Рівняння рівноваги і геометричні співвідношення записуються в приростах всіх результуючих величин за етап. Маючи на увазі застосування цих рівнянь для розв'язування технологічних задач, де мають місце великі переміщення, природним є перерахунок геометрії оболонки в результаті її деформування на кожному з етапів навантаження.

Рівняння рівноваги і геометричні співвідношення в приростах за окремий етап мають вигляд (1).

Символом  $\Delta_m F$  позначено приріст величини  $F$  на  $m$ -му етапі навантаження, а індексом « $m-1$ » результуючі значення за  $m-1$  попередніх етапів.

$$\frac{d(\Delta_m N_1)}{ds} = \frac{\Delta_m N_2 - \Delta_m N_1}{r_{m-1}} \cos \psi_{m-1} - \frac{1}{\rho_1} \Delta_m Q_1;$$

$$\frac{d(\Delta_m Q_1)}{ds} = \frac{1}{\rho_{1m-1}} \Delta_m N_1 + \frac{\sin \psi_{m-1}}{r_{m-1}} \Delta_m N_2 - \frac{\Delta_m Q_1}{r_{m-1}} \cos \psi_{m-1} - \Delta_m q_a;$$

$$\frac{d(\Delta_m M_1)}{ds} = \frac{\Delta_m M_2 - \Delta_m M_1}{r_{m-1}} \cos \psi_{m-1} + \Delta_m Q_1 + \Delta_m N_1 \Delta_m \Theta + \Delta_m N_1 \Theta_{m-1}$$

$$+ \Delta_m \Theta N_{1m-1}^{(i)} - \frac{\sin \psi_{m-1}}{r_{m-1}} (\Delta_m M_2 \Delta_m \Theta + \Delta_m M_2 \Theta_{m-1} + \Delta_m \Theta M_{2m-1});$$

$$\Delta_m \epsilon_{10} = \frac{d(\Delta_m u)}{ds} + \frac{\Delta_m w}{\rho_{1m-1}} + \frac{1}{2} (\Delta_m \Theta)^2 + \Delta_m \Theta \Theta_{m-1};$$

$$\Delta_m \epsilon_{20} = \frac{\Delta_m u}{r_{m-1}} \cos \psi_{m-1} + \frac{\Delta_m w}{\rho_{2m-1}};$$

$$\Delta_m \chi_1 = \frac{d(\Delta_m \Theta)}{ds};$$

$$\Delta_m \chi_2 = \Delta_m \Theta \frac{\cos \psi_{m-1}}{r_{m-1}} - \frac{1}{\rho_{2m-1}} (\Delta_m \Theta^2 + \Delta_m \Theta \Theta_{m-1});$$

$$\Delta_m \Theta = \frac{\Delta_m u}{\rho_{1m-1}} - \frac{d(\Delta_m w)}{ds}. \quad (1)$$

Отримано формули для уточнення геометрії після  $m$ -го етапу навантаження. Радіальна  $r$  і вертикальна  $Z$  координати точки серединної поверхні а також кут  $\psi$  між нормаллю до серединної поверхні оболонки і віссю обертання в кінці  $m$ -го етапу навантаження будуть

$$r_m = r_{m-1} + \Delta_m u_r = r_{m-1} + \Delta_m u \cos \psi_{m-1} + \Delta_m w \sin \psi_{m-1}$$

$$Z_m = Z_{m-1} + \Delta_m v = Z_{m-1} + \Delta_m u \sin \psi_{m-1} - \Delta_m w \cos \psi_{m-1}$$

$$\psi_m = \psi_{m-1} + \Delta_m \Theta = \psi_0 + \Theta_m \quad (2)$$

Радіуси кривизн в меридіональному та круговому напрямках після етапу навантаження обчислюються за формулами:

$$\frac{1}{\rho_{1m}} = \frac{d\psi_m}{ds} \frac{1}{1 + \Delta_m \epsilon_{10}} \left( \frac{1}{\rho_{1m-1}} + \Delta_m \chi_1 \right);$$

$$\frac{1}{\rho_{2m}} = \frac{\sin \psi_m}{r_m} = \frac{1}{1 + \Delta_m \epsilon_{20}} \left[ \frac{1}{\rho_{2m-1}} (1 + \Delta_m \Theta \Theta_{m-1}) + \Delta_m \chi_2 \right] \quad (3)$$

При переході до нової геометрії на наступному етапі навантаження здійснюється також перехід до нової дугової координати  $s'$  вздовж zdeформованого меридіану за формулою:

$$s' = \int_{s_0}^s (1 + \Delta_m \epsilon_{10}) ds \quad (4)$$

Приведена вище система рівнянь не пов'язана з фізичними залежностями, і тому справедлива для дослідження як пружного, так і пружно-пластичного деформування тонкостінних осесиметричних елементів конструкцій.

Отримані фізичні залежності в приростах за етап для випадку деформаційної теорії пластичності та теорії течіння.

Для запропонованих моделей розроблено алгоритми та програми числового моделювання процесу деформування, з допомогою яких розв'язана задача формування оболонки обертання з круглої пластини з жорсткою шайбою в центрі за допомогою рівномірно розподіленого нормального тиску. Задача розв'язана з використанням деформаційної теорії пластичності та теорії течіння. Початкова розрахункова схема задачі приведена на рис. 1.

Проаналізовано отримані розв'язки. Знайдено поля залишкових напружень і переміщень. Проведено дослідження напружено-деформованого стану в залежності від кількості етапів навантаження. Знайдена оптимальна величина навантаження на етап, зменшення якого не приводить до збільшення точності в зв'язку з накопиченням систематичних обчислювальних похибок.

Для перевірки адекватності розробленої моделі проведені експерименти по дослідженню напружено-деформованого стану дзеркала параболічної антени в процесі виготовлення.

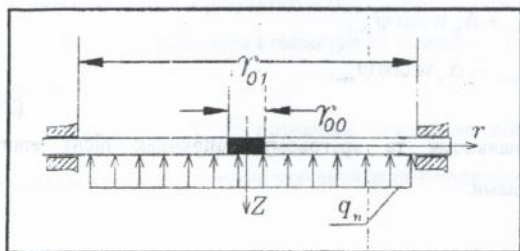


Рис. 1 Розрахункова схема задачі

Експеримент проводився в умовах реального виробництва дзеркал параболічних антен. В результаті експерименту вимірювались прогини точки  $x=0$

(центр дзеркала) при технологічному тискові видувки 0.59мПа. Дані числового моделювання дають відхилення від реального технологічного процесу приблизно 7%, що свідчить про достовірність розробленої математичної моделі. Збільшення точності числового моделювання можливе при врахуванні анізотропії листа в напрямку прокатки.

Основним результатом третього розділу є розроблена математична модель поетапного деформування осесиметричної оболонки обертання з послідовним уточненням геометрії в процесі деформування, яка дозволяє використовувати різні фізичні моделі матеріалу і адекватно описує реальний технологічний процес, а також розроблені алгоритми та програми.

Запропонована математична модель може бути використана при будь яких значеннях переміщень та деформацій в докритичній зоні деформування.

В четвертому розділі поставлено і розв'язано обернені задачі пружнопластичного деформування осесиметричних оболонок обертання. Ставиться задача визначення такого зовнішнього навантаження, під дією якого отримується задана форма деталі на кінець процесу навантаження, або ж отримується задана залишкова форма після зняття навантаження і пружного пружинення. Аналіз результатів, отриманих в попередніх розділах, показує, що дія нормального до поверхні рівномірно розподіленого тиску забезпечує просте навантаження у всіх точках конструкції. Це служить основою для використання при розв'язуванні оптимізаційних задач деформаційної теорії пластичності відомої теореми А.А.Ілюшина про розвантаження для знаходження полів залишкових напружень та деформацій, а також звужує множину навантажень тільки до класу нормального до поверхні тиску в задачах формоутворення параболічної оболонки обертання.

Зауважимо, що аналогічна задача може виникати в зв'язку з необхідністю керування формою поверхні тонкостінної конструкції в процесі експлуатації, як, наприклад, в сучасній антенній техніці.

В якості заготовки приймається кругла пластинка з жорсткою шайбою в центрі. Функціонал мети приймався в одному із слідуючих видів в безрозмірних величинах

$$J = \int_x^{x_1} \left\{ \alpha q_n^2(x) + (1 - \alpha) (w - w^*(x))^2 \right\} dx \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$J = \int_0^1 \left\{ \alpha q_n^2 + (1 - \alpha) \beta [w - f(x + \beta u)]^2 \right\} dx \rightarrow \min, \quad (6)$$

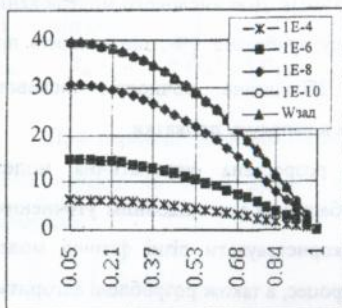


Рис. 3 Зміна прогину w

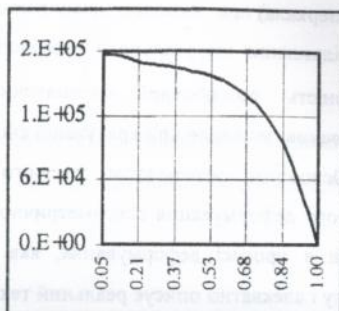


Рис. 2 Зміна оптимального тиску

Ваговий коефіцієнт  $\alpha$  введений з метою отримання в дальнішому ефективного числового методу знаходження невідомого розподілу  $Q_n(x)$ . Як видно з формул (5) і (6) в першому випадку мінімізується тільки середньоквадратичне відхилення функції прогинів від заданого розподілу без врахування перемішень точок в горизонтальному напрямку, яке враховується в другому випадку. Використовуючи в якості обмежень всі рівняння прямої задачі, з умови стаціонарності розширеного функціоналу отримано повну систему рівнянь і крайові умови для задач оптимізації. Для отримання розв'язку задачі будується ітераційний процес по параметру  $\alpha$ . В результаті числового моделювання виявлено, що врахування радіального переміщення точок серединної поверхні в функціоналі (6) значно зменшує кількість ітерацій для досягнення заданої точності.

На рис.2 приведені результати наближення полів прогинів для різних значень  $\alpha$  до заданого розподілу прогинів  $W_{зад}$ , яке відповідає формі меридіану, що задається рівнянням  $f(x)=40*(1-x^2)$ . З графіків видно, що поле  $W_{зад}$  вже при  $\alpha=10^{-10}$  практично співпадає з  $W_{зад}$ . Розподіл нормального навантаження при  $\alpha=10^{-12}$  показаний на рис.3. Розв'язування прямої задачі, коли в якості зовнішнього навантаження прийнято знайдене оптимальне, дає форму zdeформованої поверхні, відхилення якої від заданої не перевищує 1% по всіх точках.

Розроблена також математична модель поетапного наближення до шуканого розподілу зовнішнього навантаження, коли на кожному етапі здійснюється уточнення геометрії конструкції. Функціонал мети при цьому формулюється для окремого етапу навантаження у вигляді

$$J_m = \int_0^{S_{m-1}} \left\{ \alpha (\Delta_m Q_n)^2 + (1-\alpha) \beta_m \left[ (r_m(s) - r(s))^2 + (Z_m(s) - Z(s))^2 \right] \right\} r_{m-1} dr \rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $\beta_m$  - коефіцієнт, який задає ту долю середньоквадратичного відхилення між поверхнями, яке ми ліквідуємо внаслідок навантаження  $\Delta_m Q_n(s)$  за один етап. Зауважимо, що в (7) мінімізується середньоквадратичне відхилення між точками поверхонь з однаковими значеннями дугової координати  $s$ , причому сумування здійснюється по всіх точках наближеної поверхні.

### Основні результати роботи:

1. На основі розгляду осесиметричного формоутворення тонкостінних елементів конструкцій в рухомій системі координат розроблена математична модель пружнопластичного деформування оболонки з уточненням геометрії в процесі деформування.
  - ◆ Розроблена математична модель оптимізації переміщень тонкостінних осесиметричних конструкцій з метою забезпечення заданої форми меридіану на кінець етапу навантаження, або заданої залишкової форми після розвантаження.
2. Розроблені алгоритми чисельного розв'язку геометрично та фізично нелінійних задач при використанні в якості фізичних моделей деформаційної теорії пластичності та теорії течіння з ізотропним зміцненням.
3. Розроблений пакет прикладних програм розв'язування геометрично та фізично нелінійних задач деформування тонкостінних оболонкових конструкцій з використанням ЕОМ, що дозволяє:
  - розв'язувати як пружні так і пружнопластичні задачі деформування тонкостінних осесиметричних оболонок обертання, причому в якості фізичних моделей матеріалу використовується деформаційна теорія пластичності або теорія течіння, рівняння рівноваги та геометричні співвідношення використані в квадратичному наближенні без та з уточненням геометрії;
  - при використанні в якості фізичної моделі теорії течіння визначати залишкові поля внутрішніх силових факторів та переміщень;
  - розв'язувати лінійну крайову задачу методом дискретної ортогоналізації Годунова;
  - розв'язувати оптимізаційні задачі забезпечення заданого поля переміщень серединної поверхні на кінець етапу навантаження або заданої залишкової форми поверхні після зняття навантаження.

4. Розроблена методика числового моделювання технологічного процесу формоутворення оболонкових конструкцій.

У додатку подані тексти основних програмних модулів та графічні результати числового моделювання і оптимізації формоутворення тонкостінних елементів конструкцій.

Основні результати дисертаційної роботи відображені в публікаціях:

1. Шаблій О.М., Михайлишин М.С., Дячук С.Ф. Упруго-пластическое формообразование пологой оболочки вращения заданной формы. Тезисы докладов Третьей Всесоюзной конференции «Механика неоднородных структур». Часть 2, Львов, 1991, с.358.
2. Шаблій О.М., Михайлишин М.С., Дячук С.Ф. Математическое моделирование процесса образования тонкостенных элементов конструкций заданной формы. «Математические методы и физико - механические поля» 1992, №35. с.21-28.
3. Шаблій О.М., Дячук С.Ф. Математичне моделювання термопружнопластичного деформування тонких осесиметричних оболонок обертання з врахуванням геометричної нелінійності. Тези доповідей першої науково - технічної конференції ТПШ. 20-23 10.92р, м.Тернопіль., с.175.
4. Дячук С.Ф. Оптимізація процесу формоутворення тонких осесиметричних оболонок обертання. Тези доповідей другої науково - технічної конференції ТПШ. 20-23 10.93р, м.Тернопіль., с.78.
5. Шаблій О.М., Михайлишин М.С., Дячук С.Ф. Дослідження процесів пружнопластичного деформування тонкостінних елементів в технологічних задачах виготовлення деталей необхідної форми. I-ий Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків. м.Львів, 18-20.05. 1993р. с. 21.
6. Михайлишин М.С., Дячук С.Ф. Оптимізація формоутворення тонкостінних елементів конструкцій. IV-та Міжнародна конференція з механіки неоднорідних структур., Тези доповідей.- м.Тернопіль, 19-22.09.95р. с.216
7. Михайлишин М.С., Дячук С.Ф. Числове моделювання термопружно- в'язкопластичного деформування оболонок обертання. Збірник наукових праць, присвячений 60-річчю від дня народження доктора технічних наук, професора Коляно Юрія Михайловича. м Київ, 1996р. Т.2, с. 216-220.
8. Шаблій О.М., Михайлишин М.С., Дячук С.Ф. Великі пружно- в'язкопластичні деформації осесиметричних оболонок обертання. Вісник Тернопільського приладобудівного інституту імені Івана Пулюя. №2, 1996., с.28-45.

**АННОТАЦІЯ.** Дячук С.Ф. «Моделирование и оптимизация формообразования тонкостенных элементов конструкций методом упруго-пластического деформирования.»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07. «Механика твердого деформируемого тела». Тернопольский приборостроительный институт имени Ивана Пулюя. Тернополь 1996.

Рассматривается задача моделирования и оптимизации процессов формоизменения тонкостенных осесимметрических элементов конструкции. Уравнения равновесия и геометрические соотношения приняты в геометрически нелинейной постановке в квадратичном приближении. В качестве физических соотношений использованы уравнения деформационной теории пластичности и теории пластического течения с изотропным упрочнением. Разработаны алгоритмы и программы численного решения геометрически и физически нелинейных краевых задач, с использованием метода дискретной ортогонализации С.К.Годунова. Для линеаризации геометрической нелинейности применён метод Ньютона-Канторовича, физической — переменных параметров упругости. Разработана методика использования полученных моделей для решения практических задач формоизменения при помощи последовательного уточнения геометрии конструкции в процессе деформирования. Проведено численное моделирование процесса формоизменения для разных условий закрепления заготовки.

Решены задачи оптимального проектирования оболочки с заданной формой меридиана на конец процесса нагружения или с заданной остаточной формой после разгрузки. Получены математические модели, разработаны алгоритмы и программы численного решения оптимизационных задач.


**ABSTRACT.** Dyachuk S.F. «Modeling and optimization of shape forming of thin-walled structures elements by a method elastic - plastic deformation.»

The dissertation for searching of a scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) in speciality 05.02.07 «Mechanic of a deformable solid body». The Ternopil Instrument-Making institute named after Ivan Puluj. Ternopil, 1996.

The problem of modeling and optimization of shape forming of thin-walled axis-symmetric structures elements is considered. The equilibrium equations and geometric formulas are accepted in geometrically nonlinear statement in quadratic approximation. The equations of deformation theory of plasticity and of plastic flow theory are used as physical correlations. The algorithmes and computer programs of numerical solving of geometrically and physically nonlinear boundary problems by using of the S.K.Godunov method of discrete ortogonalization are developed. The Newton-Cantorovich method for linearising of geometrical nonlinearity and the variable parametres of elasticity method for linearising of physical nonlinearity are applied. The methods of using of received models for solving of practical problems of shape forming with a help of step-by-step more accurate calculating of structure geometry in the deformation process are developed. The problems of optimum designing of a shell with the given meridian form at the end of the loading process or with the given residual shape after the loading are solved. The mathematical models are reseived, the algorithmes and computer programs of optimization problems solving are developed.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** оболонки, напруження, деформації, великі переміщення, формоутворення, ізотропний, математична модель, оптимізація, тонкостінний елемент, криволінійні координати, зміна геометрія.

Ав 36.401

282001, м. Тернопіль, вул. Руська 56  
Віддруковано на видавничій системі  RIP<sup>4300</sup>  
в Тернопільському приладобудівному  
інституті ім. Ів.Пулля. Тираж 100 прим.