

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНИХ ПРОБЛЕМ МЕХАНІКИ І МАТЕМАТИКИ  
ім. Я. С. ПІДСТРИГАЧА

*На правах рукопису*

УДК 539.3

КАЗІНОВ  
Ігор Дмитрович

**РОЗРАХУНОК ТА ОПТИМІЗАЦІЯ  
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
ТЕРМОПРУЖНОПЛАСТИЧНИХ 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



AB 28.69

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі математичного моделювання Львівського державного університету ім. І. Франка при Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача АН України

Науковий керівник: член-кореспондент АН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Я.Й.Бурк

Офіційні опоненти: Доктор фізико-математичних наук,  
професор В.М. Б'гак,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Я.Г. Савула

Провідна організація : Інститут електрозварювання ім.  
Б.О.Патона АН України

Захист відбудеться " 27 " 12 1993р. о  
15 годині на засіданні спеціалізованої ради К.016.59.01 при Ін-  
ституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстри-  
гача АН України за адресою : м. Львів, вул. Наукова, 36.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту при-  
кладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача АН  
України.

Відгук на автореферат просимо надсилати на адресу: 290053,  
МСП, м. Львів, вул. Наукова, 36, вченому секретарю спеціалізова-  
ної ради.

Автореферат разіслано " 27 " 12 1993р.

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

П.Р. Шевчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасній техніці широко застосовуються конструкції, що складаються з тонкостінних елементів оболонкового типу. В процесі їх виготовлення та обробки внаслідок нагріву та силового навантаження виникають залишкові деформації та напруження, які можуть погіршувати розрахункові параметри міцності і надійності конструкцій. Отже, виникає потреба в розробці режимів та схем зовнішнього навантаження, що забезпечують зниження залишкових напружень до рівня, який диктується експлуатаційними умовами.

Розробці методів розрахунку залишкових напружень, які виникають при термопластичному деформуванні, і зокрема в процесі зварювання присвячені праці Б. Айронса, І. А. Бірґера, В. А. Винокурова, О. Зенковича, В. А. Кархіна, Л. М. Лобанова, К. Масубучі, В. І. Махненка, Ю. В. Яммировського, ... М. Шевченка та інших.

Числові методи розрахунку напружено - деформованого стану (НДС) оболонок в пружній, або термопружнопластичній постановці розроблялися в роботах Я. М. Григоренка, О. І. Великоіваненко, С. А. Капустіна, А. П. Мукоїда, І. С. Мухи, В. М. Паймушина, І. В. Прохоренка, Р. Б. Рікардса, Я. Г. Савули та інших авторів.

Теоретичні основи та методи оптимізації термопружних оболонок, в задачах зміцнювальної локальної термообробки наведено в роботах Я. Й. Бурака, Е. І. Григолика, Я. С. Підстригача. Важливі результати в галузі оптимального керування залишковим НДС тонкостінних елементів конструкцій на основі оптимізації термомеханічного навантаження в пружній та термопружнопластичній постановках розглянуті працях Л. П. Беседіної, С. Ф. Будза, Б. Л. Боженка, Ю. Д. Зогуляка, М. М. Максимовича, Ю. І. Няшина, Г. В. Пляцка, А. А. Поздеева, Я. П. Романчука, П. В. Трусова, О. М. Шаблія та інших.

Питанням оптимального керування температурними напруженнями і переміщеннями в термопружних і термов'язкопружних тілах на основі методу оберненої задачі термомеханіки і теплопровідності присвячені роботи В. М. Вігака.

Однак в літературі недостатньо уваги приділено питанням розробки методики розрахунку режимів та схем локального параметричного нагріву, які забезпечують формування оптимальних полів залишкових напружень.

Метою даної роботи є розробка методики розрахунку режимів та схем локального параметричного нагріву, які забезпечують формування залишкового НДС, її реалізація у вигляді пакету прикладних програм, застосування розробленого програмного забезпечення до розв'язання задач розрахунку та оптимізації залишкового НДС циліндричних оболонок.

Наукова новизна роботи. Для тонких оболонок зі скінченною зсувною жорсткістю розроблено методику розрахунку залишкового НДС, яка базується на теорії неізотермічного пластичного течіння, методі змінних параметрів пружності та методі скінчених елементів. Розроблено методику оптимізації залишкового НДС оболонок за допомогою локального параметричного нагріву. Методика проілюстрована на задачі для циліндричної оболонки з початковим розподілом пластичних деформацій, та задачі розрахунку параметрів локального, супутнього основному, додаткового нагріву оболонки, який забезпечує формування оптимального залишкового НДС. Здійснено програмну реалізацію розробленої методики.

Достовірність основних наукових результатів забезпечується коректністю математичної постановки задач, строгістю математичних викладок та використанням обґрунтованих методів розв'язування, аналізом наближених розв'язків, отриманих на різних просторових і часових сітках, узгодженням результатів кількісного аналізу з наведеними в літературі окремими експериментальними та розрахунковими даними.

Практична цінність роботи полягає в розробленому програмному забезпеченні для розрахунку та оптимізації залишкового НДС тонкостінних елементів конструкцій шляхом керування параметрами їх нагріву. Розроблений пакет програм дозволяє розв'язувати задачі для оболонок складної геометрії, враховувати залежність механічних характеристик матеріалу від температури, використовувати інші закони пластичного течіння, умови текучості, граничні умови. Розроблене програмне забезпечення дає можливість розв'язувати задачі не лише про мінімізацію залишкових напружень, а й про цільове формування полів залишкових напружень, деформацій, або переміщень, які задовольняють вибраному критерію. Деякі результати роботи впроваджено в практику інженерного проектування ВО "Стре-

ла" ( м.Оренбург, Росія ) .

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідалися на конференції "Проблеми зниження матеріалоемкости силових конструкций" (Горький, 1984), VI з'їзді по теоретичній і прикладній механіці (Ташкент, 1986), Школі молодих вчених "Численные методы механики сплошной среды" (Абакан, 1989), науково-технічній конференції "Численные методы решения задач строительной механики, теории упругости и пластичности" (Волгоград, 1990), XV конференції по теорії оболонок і пластин (Казань, 1990), конференції "Сварные конструкции" (Київ, 1990), науково-технічній конференції "Основные направления создания и совершенствования сосудов, аппаратов, котлов и трубопроводов высокого давления" (Іркутськ, 1991), науково-технічному семінарі "Применение математических методов и САПР в сварке" (Ленінград, 1991), конференції з тепломасопереносу (Юрмала, 1991), Третій конференції з механіки неоднорідних структур (Львів, 1991), на наукових конференціях Львівського університету та наукових семінарах кафедри математичного моделювання Львівського університету.

Дана робота складається зі вступу, трьох розділів, закінчення та додатку. У вступі дано короткий аналіз робіт по темі дисертації та коротко викладено зміст роботи по розділах.

В першому розділі описується математична постановка задачі визначення залишкового НДС в твердому деформівному тілі, що перебуває під дією температурного та силового навантаження.

Нехай розглядуване тіло займає область  $V \in R^3$ , обмежену поверхнею  $S$ . В початковий момент часу  $t=t_0$  в тілі відсутні напруження і деформації. Починаючи з  $t=t_0$  до  $t=t^*$  на тіло діє теплове та силове навантаження. Необхідно визначити напружено - деформований стан для довільного моменту часу  $t > t_0$ .

Математична модель квазістатичного пружно - пластичного деформування твердого тіла під дією теплового та силового навантаження складається з рівнянь рівноваги, співвідношень Коші, визначальних фізичних співвідношень теорії неізотермічного пластичного течіння, граничних умов, які в матричній формі записуються наступним чином

$$[\sigma]^T \{\sigma\} + \{\bar{F}(t)\} = 0, \quad (1)$$

$$\{e\} = [C_{1/2}] [\sigma]^T \{u\}, \quad (2)$$

$$\{\dot{e}\} = \{\dot{e}_\sigma\} + \{\dot{e}_T\} + \{\dot{e}_p\}, \quad (3)$$

$$\{e_\sigma\} = [D_\sigma]^{-1} \{\sigma\}, \quad \{\dot{e}_T\} = \alpha(T) \{\dot{T}, \dot{T}, \dot{T}, 0, 0, 0\}^T,$$

$$\{\dot{e}_p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{11}}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{22}}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{12}}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{23}}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{31}} \right\}^T,$$

$$[\nu]^T \{\sigma\} \Big|_{S_1} = \{\bar{\sigma}(t)\}, \quad \{u\} \Big|_{S_2} = \{\bar{u}(t)\}. \quad (4)$$

Тут  $[\sigma]$  - операторна матриця,  $[\nu]$  - матриця напрямних косинусів вектора зовнішньої нормалі  $\nu$  до  $S$ ,  $\{\sigma\}$ ,  $\{\bar{F}\}$ ,  $\{e\}$ ,  $\{u\}$ ,  $\{\bar{\sigma}\}$ ,  $\{\bar{u}\}$  - матриці - стовбці відповідно компонент тензора напружень, заданих компонент вектора об'ємних сил; компонент тензора деформацій; компонент вектора переміщень; заданих на частині  $S_1$  границі тіла  $S$  компонент вектора напружень, та на частині  $S_2$  границі  $S$  - компонент вектора переміщень. Крапка над величинами означає похідну по часу, індекси "т", "σ", "р" позначають відповідно теплову, пружну та пластичну складові деформації;  $\alpha(T)$  - коефіцієнт теплового розширення;  $[D_\sigma] = 3K(T)[A_1] + 2G(T)[A_2]$ ;  $\lambda$  - коефіцієнт пропорційності закону пластичного течіння, асоційованого з умовою текучості Мізеса  $f = \sigma_u^2 - \sigma_T^2 (e_p^p, T) = 0$ ;  $K(T)$  - модуль об'ємного стиску;  $G(T)$  - модуль зсуву;  $\sigma_u$  - інтенсивність напружень;  $\sigma_T$  - границя текучості;  $e_p^p$  - інтенсивність нагромадженої пластичної деформації;  $[A_1]$ ,  $[A_2]$ ,  $[C_{1/2}]$  - числові матриці,  $T$  - температура.

В наступному параграфі описується методика розв'язування задачі термопластичності. Весь час навантаження від  $t=t_0$  до  $t=t^*$  розбивається на  $N$  етапів навантаження точками часової сітки  $t = \{t_0 < t_1 < \dots < t_N = t^*\}$ . Рівняння (1-4) для моменту часу  $t=t_n$ , що відповідає кінцю  $n$ -го етапу навантаження записуються наступним чином

$$\begin{aligned} [ \vartheta ]^T \{ \sigma \}_n + \{ \bar{P} \}_n &= 0, \quad \{ e \}_n = [ C_{1,2} ] [ \vartheta ]^T \{ u \}_n \\ \{ e \}_n &= [ D_{op} ]_n^{-1} \{ \sigma \}_n + \{ e^* \}_{n,n-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

$$[ \nu ]^T \{ \sigma \}_{S_1} = \{ \tilde{\sigma} \}_n, \quad \{ u \}_{S_2} = \{ \tilde{u} \}_n.$$

Тут  $\{ e^* \}_{n,n-1} = \{ e \}_{n-1} - [ D_{op} ]_{n-1}^{-1} \{ \sigma \}_{n-1} + \{ \Delta e_T \}_n$  - додаткові деформації для  $n$ -го етапу навантаження;  $\{ \Delta e_T \}_n$  - приріст теплових деформацій;  $[ D_{op} ]_n = 3K_n^0 [ A_1 ] + 2G_n^0 [ A_2 ]$ ;  $[ D_{op} ] = 3K_n^0 [ A_1 ] + 2G_n [ A_2 ]$ .

$$G_n = G_n^0 / (1 + 2\Delta \lambda_n (f_n)); \quad G_n^0 = G(T_n); \quad K_n^0 = K(T_n).$$

Співвідношення (5) складають повну систему рівнянь для визначення  $\{ u \}_n$ ,  $\{ e \}_n$ ,  $\{ \sigma \}_n$  і апроксимують вихідну задачу з похибкою  $O(\Delta t_n)$ . Для розв'язання системи рівнянь (5) застосовується метод змінних параметрів пружності. Він полягає в тому, що для модуля зсуву  $G_n$  задається початкове наближення  $G_n^0 = G(T_n)$ , номер ітерації  $j$  приймається рівним одиниці ( $j=1$ ) і розв'язується система лінійних рівнянь

$$\begin{aligned} [ \vartheta ]^T \{ \sigma \}_n^j + \{ \bar{P} \}_n &= 0, \quad \{ e \}_n^j = [ C_{1,2} ] [ \vartheta ]^T \{ u \}_n^j \\ \{ \sigma \}_n^j &= [ D_{op} ]_n^{j-1} ( \{ e \}_n^j - \{ e^* \}_{n,n-1} ), \end{aligned} \quad (6)$$

$$[ \nu ]^T \{ \sigma \}_{S_1}^j = \{ \tilde{\sigma} \}_n, \quad \{ u \}_{S_2}^j = \{ \tilde{u} \}_n.$$

де  $[ D_{op} ]_n^{j-1} = 3K_n^0 [ A_1 ] + 2G_n^{j-1} [ A_2 ]$ . Тут величина  $G_n^{j-1}$  є відомою з попереднього наближення. Нове наближення для модуля зсуву отримується за формулами

$$G_n^J = \begin{cases} q G_n^{J-1} + (1-q) G_n^0, & \text{якщо } f_n^J < -\varepsilon \\ G_n^{J-1}, & \text{якщо } |f_n^J| < \varepsilon \\ G_n^{J-1} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)_n^J, & \text{якщо } f_n^J > \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

Умова збіжності має вигляд  $|G_n^J/G_n^{J-1} - 1| < \varepsilon$ . Величини  $q \in (0, 1)$ ,  $\varepsilon > 0, \delta > 0$  є параметрами ітераційного процесу і визначають його точність і швидкість збіжності.

Задача (6) є еквівалентною до варіаційної задачі

$$L_n^J = \frac{1}{2} \int_V \left( \left\{ e \right\}_n^J - \left\{ e^* \right\}_{n,n-1} \right)^T \left\{ \sigma \right\}_n^J dV - \int_V \left( \left\{ u \right\}_n^J \right)^T \left\{ \bar{F} \right\}_n dV - \int_{S_1} \left( \left\{ u \right\}_n^J \right)^T \left\{ \bar{\sigma} \right\}_n dV \rightarrow \min, \quad (8)$$

де  $\left\{ e \right\}_n^J = [C_{1/2}] \left[ \vartheta \right]^T \left\{ u \right\}_n^J$ ;  $\left\{ \sigma \right\}_n^J = [D_{\sigma p}]_n^{J-1} \left( \left\{ e \right\}_n^J - \left\{ e^* \right\}_{n,n-1} \right)$ .

а переміщення належать простору Соболева  $W_2^1(V)$  і задовольняють заданим на  $S_2$  граничним умовам. Розроблена методика передбачає пряму мінімізацію (8) методом скінчених елементів.

У другому розділі дано математичну постановку задачі визначення НДС тонких оболонок зі скінченною зсувною жорсткістю.

Нехай розглядувана оболонка займає область

$$V = \left\{ \vec{r}_v = \vec{r}(a_1, a_2) + \xi \vec{n}(a_1, a_2), (a_1, a_2) \in \Omega_0, \xi \in [-h, h] \right\}. \quad (9)$$

Тут  $\vec{r}(a_1, a_2)$  - вектор-функція, що описує серединну поверхню оболонки,  $\vec{n}(a_1, a_2)$  - вектор-функція одиничної нормалі до неї,  $\Omega_0 \subset \mathbb{R}^2$  - область зміни параметрів  $a_1$  і  $a_2$ . На проміжку часу від  $t=t_0$  до  $t=t^*$  на оболонку діють силові й теплове навантаження. Ставиться задача визначення НДС оболонки для довільного моменту часу  $t > t_0$ .

Математична модель пружно-пластичного деформування оболонки складається з рівнянь (1) - (4) і гіпотез теорії оболонок С.П. Тимошенка

$$\sigma_{33} = 0, u_k = u_k(a_1, a_2) + \xi \gamma_k(a_1, a_2), u_3 = w(a_1, a_2); (k=1, 2). \quad (10)$$

У відповідності до підходу, наведеного в першому розділі задача термопластичності для оболонок зводиться до послідовного

розв'язування в переміщеннях варіаційної задачі (8) з уточненням на кожній ітерації модуля зсуву  $G_n^j$  відповідно до (7). В дисертації, на основі формул (8) і (10), формулюється варіаційна постановка задачі визначення переміщень серединної поверхні оболонки.

$$L = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left( [B] \{u\}_n^j \right)^T [D]_n^{j-1} \left( [B] \{u\}_n^j \right) d\Omega - \iint_{\Omega} \left( [B] \{u\}_n^j \right)^T \{S^*\}_{n,n-1} d\Omega - \iint_{\Omega} \left( \{u\}_n^j \right)^T \{F^*\}_n d\Omega - \int_{\Gamma_1} \left( \{u\}_n^j \right)^T [G] \{T\}_n d\Gamma \longrightarrow \min \quad (11)$$

$\{u\} = (u_1, u_2, w, \gamma_1, \gamma_2)^T$  - матриця - стовбець узагальнених переміщень серединної поверхні оболонки, що задовольняють заданим умовам закріплення і належать просторові  $W_2^1(\Omega)$ , де  $\Omega$  - серединна поверхня оболонки.

На кожній ітерації методу змінних параметрів пружності після визначення переміщень з умови мінімуму функціоналу (11), визначаються компоненти деформації серединної поверхні оболонки

$\{\varepsilon\}^j = [B] \{u\}^j$ , де  $\{\varepsilon\} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{31}, \kappa_1, \kappa_2, 2\kappa_{12})^T$ . Роз-

поділ деформацій по товщині оболонки в лінійним  $\{e\}^j = \{\varepsilon_0\} + \{\kappa_0\}$ ,

тут  $\{\varepsilon_0\} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{31})^T$ ,  $\{\kappa_0\} = (\kappa_1, \kappa_2, 2\kappa_{12}, 0, 0)^T$ . Напруження

обчислюються за формулами  $\{\sigma\}_n^j = [D^*]_n^{j-1} (\{e\}_n^j - \{e^*\}_{n,n-1})$ , які ви-

пливають з (6) і (10),  $\{\sigma\}_n^j = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31})^T$ . За формулами (7)

визначаються нові значення змінного модуля зсуву  $G_n^j$ .

В наступному параграфі описується схема розв'язування задачі (11) методом скінчених елементів. Для апроксимації переміщень застосовуються квадратичні ізопараметричні скінчені елементи. Інтегрування здійснюється чисельно методом Гауса. Описане програмне забезпечення, що реалізує запропоновану методику.

Розглянуто ряд задач, які підтверджують вірогідність результатів, отримуваних за допомогою даної методики, а також ілюст-

рують можливості розробленого програмного забезпечення: визначення напружено - деформованого стану термопружнопластичної оболонки, що знаходиться під дією осесиметричного та неосесиметричного нагріву. Результати кількісного аналізу порівнювалися з наведеними в літературі окремими експериментальними та розрахунковими даними.

В третьому розділі описано методику оптимізації залишкового НДС оболонок за допомогою локального параметричного нагріву, яка проілюстрована на задачі про оптимізацію залишкового НДС оболонки з початковим розподілом пластичних деформацій, та задачі розрахунку параметрів локального, супутнього основному, додаткового нагріву оболонки, який забезпечує формування оптимального залишкового НДС.

Задача оптимізації НДС оболонок з початковими деформаціями з допомогою локальної термообробки формується наступним чином. Розглядається циліндрична оболонка, геометрія якої описується формулою (9), де  $a_1 \in [-L, L]$ ,  $a_2 \in [0, 2\pi]$ , із знайденим у другому розділі осесиметричним полем пластичних початкових деформацій

$$\left\{ e_p^0 \right\} = \left\{ e_p^0(a_1, t) \right\}, \quad e_u^p = e_u^p(a_1, t), \quad (12)$$

що утворилися внаслідок нагріву оболонки температурним полем,

$$T_0(a_1, t) = T^0 \left[ \operatorname{erf} \left\{ \frac{a_1 + l}{\sqrt{4at}} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{a_1 - l}{\sqrt{4at}} \right\} \right], \quad (13)$$

всі параметри якого є заданими. На границях  $a_1 = \pm L$  задано умови шарнірного опирання. Під час термообробки оболонка нагрівається температурним полем

$$T(a_1, t) = T^0 \left[ \operatorname{erf} \left\{ \frac{a_1 + b - l}{\sqrt{4at}} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{a_1 - b - l}{\sqrt{4at}} \right\} \right], \quad (14)$$

де  $T^0 \geq 0$ ,  $b \geq 0$  - шукані параметри нагріву. В процесі нагріву в оболонці має місце пружно - пластичне деформування і змінюється розподіл залишкових (непружних) деформацій. Залишковий напружений стан, який виникає в результаті термообробки, будемо характеризувати величиною  $Q = \max_v \max \left\{ |\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1| \right\}$ ,

де  $\sigma_i$  - головні залишкові напруження.

Задача оптимізації формується наступним чином: визначити параметри нагріву  $T^0$  і  $b$  з умов

$$Q=Q(T^0, b) \longrightarrow \min \quad (15)$$

$$(T^0, b) \in \Lambda = \left\{ (T^0, b): T^0 \in [0, T^{\max}], b \in [0, L] \right\}$$

Методика розв'язування задачі (15) є такою. В області зміни параметрів  $T^0$  і  $b$  вводиться рівномірна сітка. Із цієї множини вузлів цільовим підбором формується дискретна множина точок,

$$\bar{\Lambda} = \left\{ (T^0, b)_i^0 \in \Lambda, i = 1, N_p \right\} \quad (16)$$

які використовуються як стартові для побудови  $N_p$  мінімізуючих послідовностей

$$(T^0, b)_i^{(k+1)} = \# \left\{ (T^0, b)_i^{(k)} \right\} \quad k=0, 1, \dots; i = 1, N_p \quad (17)$$

$$Q(T^0, b)_i^{(k+1)} \leq Q(T^0, b)_i^{(k)}.$$

В  $k$ -й точці  $i$ -ї мінімізуючої послідовності обчислюється значення функціоналу  $Q(T^0, b)_i^{(k)}$ . Для цього розв'язується задача термопластичності для оболонки, що нагрівається температурним полем (14) із заданими параметрами  $(T^0, b)_i^{(k)}$  і знаходяться поля залишкових напружень, за якими й обчислюється величина функціоналу  $Q$ . Вказана задача термопластичності розв'язується за методикою, що викладена в другому розділі. Функція  $\#$ , яка описує мінімізуючі послідовності (17), залежить від прийнятого в основу числового методу мінімізації функціоналу  $Q$ , як функції параметрів  $T^0$  і  $b$ . В даній роботі використовується метод деформівного многогранника. Обмеження на параметри оптимізації враховуються методом штрафних функцій.

З кожної точки множини (16) будується мінімізуюча послідовність, в результаті отримується множина, що складається з  $N_p$  локальних мінімумів. Із них вибирається найменший, а відповідні йому значення  $T^0$  і  $b$  приймаються за розв'язок задачі (15). Вибором цих значень параметрів оптимізації завершається розв'язування задачі (15). Одночасно отримується залишковий НДС, що відповідає знайденим значенням параметрів  $T^0$  і  $b$ .

Запропонована методика застосовується також до задачі розрахунку параметрів локального, супутнього основному, додаткового нагріву оболонки, який забезпечує формування оптимального залишкового НДС.

Розглядається шарнірно оперта циліндрична оболонка, нагрів якої

здається виразом

$$T = T_0(a_1, t) + T_1(a_1, t), \quad (18)$$

де перший доданок визначається формулою (13) (основний нагрів).

Супутній нагрів  $T_1(a_1, t) = \mu(t, \tau) S(a_1, a, b, p_1, \dots, p_m)$ , де  $\mu(t) = T(0, t + \tau) / T(0, \tau)$ ,  $S(a_1) = 0$  при  $a_1 \in [0, a] \cup [b, L]$ ,  $\int S(a_1) = S_n(a_1, a, b, p_1, p_2, \dots, p_m)$  при  $a_1 \in [a, b]$ , а раціональний сплайн  $S_n$  задовольняє умовам  $S_n(a_1^i) = p_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $S_n(a) = S_n(b) = 0$ ,  $S_n'(a) = S_n'(b) = 0$ , залежить від параметрів  $\tau, a, b, p_1, \dots, p_m$ , які підлягають визначенню в процесі оптимізації.

Під дією температурного поля (18) в оболонці формуються поля залишкових пластичних деформацій і напружень. Для оцінки залишкових напружень застосовується величина  $q = \max \sigma_u / \sigma_T$ , що залежить від параметрів нагріву  $\tau, a, b, p_1, \dots, p_m$ .

Ставиться задача знаходження параметрів нагріву  $T_1$  з умов

$$q = q(\tau, a, b, p_1, \dots, p_m) \longrightarrow \min \quad (19)$$

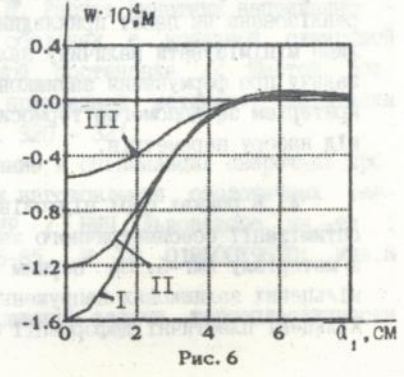
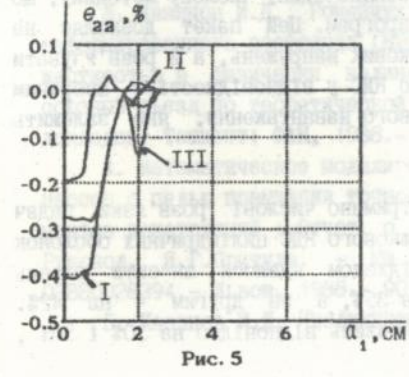
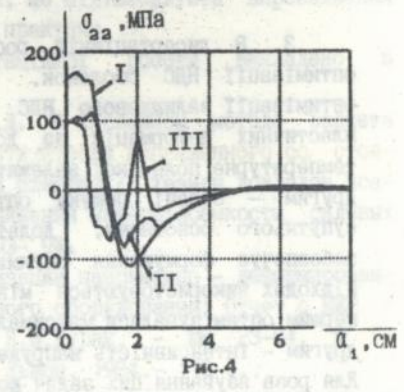
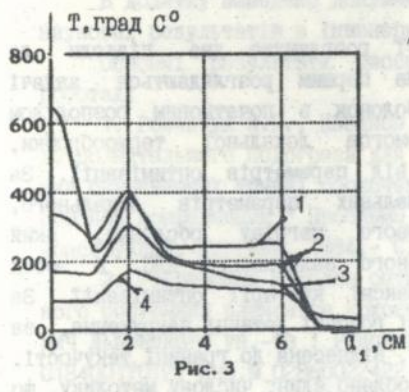
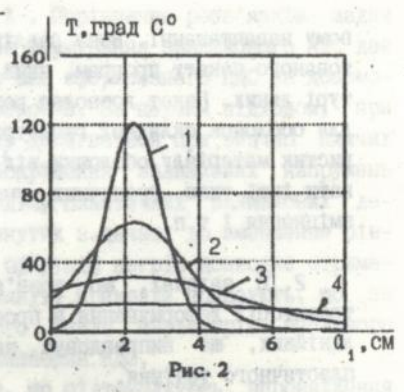
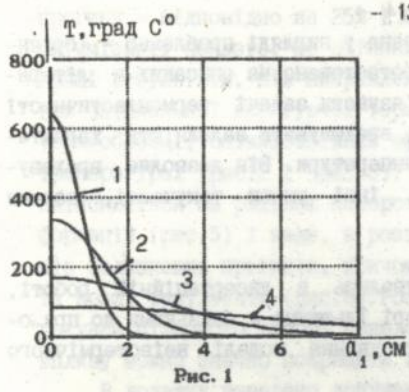
$$\tau \geq 0, \quad 0 \leq a \leq b \leq L, \quad p_1 \geq 0, p_2 \geq 0, \dots, p_m \geq 0.$$

Сформульована задача оптимізації розв'язується на основі запропонованої вище методики знаходження параметрів нагріву.

Деякі результати розрахунків зображено на рис. 1-6. Розглядалася циліндрична оболонка радіуса  $R=0.1\text{м}$ , товщини  $2h=0.005\text{м}$ , довжини  $2L=0.4\text{м}$ . Для основного нагріву (13) приймалися наступні значення параметрів  $T^*=1200\text{C}^\circ$ ,  $l=0.004\text{м}$ . По осі абсцис на всіх графіках відкладено значення координати  $a_1$ . На рис. 1-3 зображено температурні поля, що описуються відповідно формулами (13), (14), (18). Цифрами "1" - "4" відмічено графіки, що відповідають моментам часу  $t = 0.5, 2, 8, 16\text{с}$ . На рис. 4 по осі ординат відкладено значення кільцевих напружень, на рис. 5 - кільцевих пластичних деформацій, на рис. 6 - прогинів. На рис. 4 - 6 символами "I"-"III" позначено графіки, що відповідають температурним полям, які описуються відповідно формулами (13), (14), (18).

В закінченні сформульовано основні результати та висновки, отримані в роботі.

1. На основі теорії неізотермічного пластичного течіння, теорії оболонок зі скінченною зсувною жорсткістю, методу змінних параметрів пружності і методу скінчених елементів розроблено методику розрахунку залишкового НДС оболонок при заданому термосило-



вому навантаженні. Вона реалізована у вигляді проблемно - орієнтованого пакету програм, який протестовано на описаних в літературі даних. Пакет дозволяє розв'язувати задачі термопластичності для оболонок складної геометрії, враховувати залежність характеристик матеріалу оболонки від температури. Він дозволяє враховувати інші типи граничних умов, інші умови текучості, закони зміцнення і т.п.

2. В задачах, що розв'язувались в дисертаційній роботі, траєкторії деформування в просторі Ільюшина є близькими до прямолінійних, що виправдовує застосування моделі неізотермічного пластичного течіння.

3. В дисертаційній роботі розглянуто два підходи до оптимізації НДС оболонок. За першим розглядаються задачі оптимізації залишкового НДС оболонок з початковим розподілом пластичних деформацій за допомогою локальної термообробки, температурне поле якої залежить від параметрів оптимізації. За другим - задачі пошуку оптимальних параметрів локального, супутнього основному, додаткового нагріву оболонки, який забезпечує формування оптимального залишкового НДС. В обох підходах використовуються мінімаксні критерії оптимізації. За першим оптимізувалися максимальні головні дотичні напруження, за другим - інтенсивність напружень, віднесена до границі текучості. Для розв'язування цих задач розроблено єдину числову методику, що реалізована як пакет прикладних програм. Цей пакет дозволяє не лише мінімізувати величину залишкових напружень, а й розв'язувати задачу про формування залишкового НДС у відповідності з вибраним критерієм за допомогою термосилового навантаження, яке залежить від набору параметрів.

4. В рамках обох підходів отримано числові розв'язки задач оптимізації осесиметричного залишкового НДС циліндричних оболонок з матеріалу АМг-6. За першим підходом вдалося знизити рівень кільцевих залишкових напружень на 35%, а за другим - на 42%. Кільцеві пластичні деформації знизились відповідно на 30% і 50%.

прогини - відповідно на 25% і 65%. Порівняння розв'язків задач оптимізації показує, що оптимальне формування залишкового НДС дає кращі результати, ніж виправлення вже сформованого НДС за допомогою оптимальної коригуючої термообробки. За першим підходом, при термообробці, оптимізаційний ефект досягається при значно нижчих температурах (рис.2 і рис.3). Покращення залишкових напружень здійснюється за рахунок перерозподілу пластичних залишкових деформацій (рис.5) і веде, в розглянутих задачах, до зменшення рівнів залишкових прогинів, причому суттєвий нагрів дозволяє отримати кращі результати (рис.6). Розглянуті приклади показують, що за рахунок цільового вибору невеликого числа параметрів теплового впливу можна значно покращити залишковий НДС.

В додатку наведено документи, що підтверджують впровадження наукових результатів в інженерну практику.

Основні результати дисертаційної роботи викладено в роботах:

1. Романчук Я.П., Казинов И.Д. О численном методе расчета до полнительного подогрева для оптимизации напряженного состояния свариваемых тонких оболочек и пластин // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Проблемы снижения материалоемкости силовых конструкций.-Горький, 1984.- С. 93- 94.

2. Разработка методов оптимизации напряженно - деформированного состояния элементов криогенного оборудования: Отчет о НИР / НИЧ Львовского ун.-та : Руковод. Я.И.Бурак. - Мм 23-84, № ГР 01840017072; Инв.№ 02860022422.- Львов, 1984.- 110 с.

3. Казинов И.Д., Романчук Я.П. Расчет кинетики напряженно - деформированного состояния (НДС) оболочек с конечной сдвиговой жесткостью в физически нелинейной постановке // Шестой Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов.-Ташкент: ФАН, 1986.- С. 320 - 321.

4. Математическое моделирование и оптимизация сварочных процессов с целью повышения точности изготовления оболочечных элементов конструкций : Отчет о НИР / НИЧ Львовского ун.-та : Руковод. Я.Г.Притула. - Мм 56-85, № ГР 01850079670; Инв.№ 02880028394.- Львов, 1985.- 90 с.

5. Казинов И.Д. Численное решение задачи термопластичности

для оболочек с конечной сдвиговой жесткостью // Тезисы докладов Школы молодых ученых "Численные методы механики сплошной среды", ч.2.-Красноярск, 1989.- С. 78-79.

6. Романчук Я.П., Казинов И.Д. Численный анализ кинетики формирования напряженно - деформированного состояния свариваемых тонкостенных конструкций // Тезисы докладов Международной конференции "Сварные конструкции".-Киев, 1990.- С. 115-116.

7. Бурак Я.И., Казинов И.Д., Романчук Я.П. Расчет и оптимизация остаточного напряженно - деформированного состояния свариваемых тонкостенных элементов конструкций // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Основные направления создания и совершенствования сосудов, аппаратов, котлов трубопроводов высокого давления".-М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1991.- С. 125.

8. Казинов И.Д. Расчет кинетики напряженно-деформированного состояния неоднородных тонкостенных элементов конструкций под действием температурного и силового нагружения // Механика неоднородных структур. Тезисы докладов Третьей Всесоюзной конференции.-Львов., 1991.-С. 137.

9. Romanchuk Ya.P., Vagin P.P., Kazynov I.D. Calculation of the thermal strain shell constructions state with geometric and physical non-linearness account. // Abstracts of reports International conference "Heat and mass transfer in technological processes".-Jurmala, 1991.-P.125-126.



Підписано до друку 19.ІІ.93.Формат 60х84/16.Друк офсет.Папір  
д.мас.вид.Умов.др.арк.0,93.Умов.фарб.-відб.І,І7.Обл.-вид.арк.  
0,8.Тираж 80 прим.Зам.3337.

---

Обласна книжкова друкарня,290000,Львів,Стефаника,ІІ.

1. The first part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

2. The second part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

3. The third part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

4. The fourth part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

5. The fifth part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

6. The sixth part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

7. The seventh part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

8. The eighth part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

9. The ninth part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

462849

AB 28.697