

На правах рукопису

**КРОТЕНКО**  
*Петро Дмитрович*

УДК 539.3

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМУВАННЯ  
ТОНКИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ  
ПЕРЕМІЩЕНЬ ВІД ЗВАРЮВАННЯ КРУГОВИХ ШВІВ

01.02.04 —  
механіка деформівного твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона АН України.

Наукові керівники : - член-кор. АН України, доктор технічних наук,  
професор Лобанов Л. М.  
- доктор фізико-математичних наук, професор  
Чехов В. М.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор  
Чернишенко І. С.  
- кандидат фізико-математичних наук, доцент  
Кешч Т. П.

Провідна організація: КБ "Південне." ( м. Дніпропетровськ ).

Заявка відбудеться "1" грудня 1993 р. о "15.00" на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.18.09 в Київському університеті ім. Тараса Шевченка за адресою: 252127, м. Київ, просп. академіка Глушкова, 6, КУ, механіко-математичний факультет ауд. 45.

З дисертацією можна познайомитись у бібліотеці Київського університету ім. Тараса Шевченка.

Автореферат розісланий 29 жовтня 1993 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних  
наук, доцент

*В. Ковальчук*

Ковальчук В. Ф.

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00810488 (Т)

Актуальність проблеми. Проблема забезпечення точності виготовлення тонкостінних зварних конструкцій, поверхня яких обтікається зовнішнім середовищем, актуальна більш всього в аерокосмічній і кораблебудівній галузях машинобудування. Це пов'язано з тим, що зміни в геометрії поверхні, які обумовлені наявністю залишкових деформацій, приводять до погіршення аеродинамічних властивостей конструкції.

Методам зменшення залишкових зваривальних деформацій присвячені роботи В. А. Винокурова, Л. М. Лобанова, В. І. Махненка, Г. А. Ніколаєва, А. Я. Недосеки, В. І. Павловського, К. Masubuchi і багатьох інших дослідників. Ефективним є метод попередньої пружної деформації зварюваних елементів конструкції. Стосовно сферичних оболонок даний метод розвивався в роботах І. М. Жданова, А. С. Карпенка, І. В. Пархоменка, Л. М. Лобанова і В. І. Павловського. Методика розрахунку залишкового напружено-деформованого стану при зварюванні кругових швів на поверхні сферичної оболонки розроблена В. І. Махненком і Є. А. Великоіваненком. Проведені дослідження дозволяють визначати параметри попереднього пружного вигину для сферичних оболонок при зварюванні кругових фланців. Для циліндричних оболонок методи розрахунку напружено-деформованого стану при попередньому пружному вигині околиці кругового отвору, а також очікуємих величин залишкових прогинів при зварюванні кругових швів відсутні.

Розв'язанням крайових задач для пологої циліндричної оболонки з круговими отворами займалися А. І. Лур'є, О. М. Гузь, Г. М. Савін, В. М. Чехов, Ю. А. Шевляков, А. К. Приварников, С. В. Зекора, I. G. Lekkerkerker, A. K. Naghdi, A. G. Eringen, Van Dyke та ін.

Суцільна циліндрична оболонка при дії зосереджених навантажень, які розподілені вздовж лінії твірної розглянута в роботах В. І. Григोलіка, Н. Г. Гур'янова, Ю. П. Жигалко, В. М. Толкачев, M. J. Hoff, J. Karpner, P. K. G. Odqvist, P. V. Pohle.

При попередньому пружному вигині околиці кругового отвору взаємодія жорстких кільцевих штампів, по лініях кіл, з поверхнею оболонки має контактний характер. В. І. Григोलіком і В. М. Толкачевим розглянуто контактну взаємодію жорстких штампів з тонкою циліндричною оболонкою в випадку контакту вздовж напрямної або твірної циліндричної поверхні.

Серед експериментальних методів оцінки напружено-деформованого стану тонкостінних пружних конструкцій певними перевагами виділяється метод голографічної інтерферометрії. До них слід віднести: можливість проведення експериментів на натурних конструкціях, висока чутливість, бесконтактність зняття інформації з досліджуваної поверхні, визначення трьох компонент вектора переміщень в вигляді неперервних полів. Даний метод отримав розвиток в роботах Е.Б. Александрова, Л.М. Лобанова, Ю.П. Островського, В.А. Півторєка, В.П. Щепинова, В.В. Яковлева, А. Е. Ennos, J.E. Sollid, С.М. Vest. Дослідженням деформованого стану циліндричних оболонок з отворами присвячені роботи В.А. Жилкіна, Л.А. Бориняка, В.О. Індіоєва, В.С. Писарева, А.П. Устименка, В.П. Щепинова, В.В. Яковлева.

Із викладеного вище випливає актуальність розробки методу розрахунку параметрів попереднього пружного вигину околиці кругового отвору в циліндричній оболонці, а також експериментальної оцінки вірогідності розрахункових результатів. Виконані дослідження сприятимуть використанню в інженерній практиці ефективного методу забезпечення точності і підвищення якості виготовлення тонкостінних зварних оболоноквих конструкцій.

Метою роботи є розробка методу розрахунку параметрів попереднього пружного вигину околиці кругового отвору в циліндричній оболонці при зварюванні жорсткого кругового фланця, що включає:

1. Постановку і розв'язання задачі про контактну взаємодію двох жорстких концентричних кільцевих штампів з пологою циліндричною оболонкою, коли внутрішній штамп діє по границі кругового отвору.
2. Побудову наближеної математичної моделі для визначення залишкового прогину пологої циліндричної оболонки при зварюванні жорстких кругових фланців і розробку методики вибору параметрів попереднього пружного вигину.
3. Створення комплексу програм з метою розрахунку напружено-деформованого стану як при пружному вигині, так і при визначенні залишкового прогину.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в тому, що в ній вперше отримані наступні результати:

1. Розв'язана задача про дію на пологую циліндричну оболонку нормальних навантажень, що розподілені по заданому закону вздовж ліній двох концентричних кіл. Розглянута суцільна оболонка і

оболонка, у якій внутрішнє коло співпадає з границею кругового отвору.

2. Розв'язана задача про контактну взаємодію двох жорстких кільцевих штампів з поверхнею пологої циліндричної оболонки. Особливо розглянута суцільна оболонка і оболонка з круговим отвором, вздовж границі якого діє внутрішній штамп.
3. Виявлені суттєві закономірності взаємодії жорстких кільцевих штампів з поверхнею пологої циліндричної оболонки.
4. Побудована наближена математична модель для визначення залишкового прогину пологої циліндричної оболонки при зварюванні жорстких кругових фланців і розроблена методика вибору параметрів пружного вигину.

Вірогідність результатів обумовлена строгістю постановки задачі, що включає: 1) описання характеру напружено-деформованого стану диференціальними рівняннями теорії пологих циліндричних оболонок; 2) використання точних розв'язків розв'язувального диференціального рівняння; 3) перевіркою точності виконання граничних умов.

Виконано порівняння величин нормальних переміщень поверхні пологої циліндричної оболонки при попередньому пружному вигині околиці кругового отвору, визначених автором методом голографічної інтерферометрії і теоретичним шляхом.

Практична цінність. Робота виконана згідно планів наукових досліджень, держбюджетної і госцдогоспіншої тематики відділу оптимізації зварних конструкцій нової техніки Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона АН України, в рамках теми "Разработать и внедрить высокоэффективные технологические методы и средства регулирования формоизменений конструкций при сварке стыковых и тавровых соединений изделий новой техники из металлических и неметаллических материалов с целью повышения точности их изготовления, надежности и экономии материалов."

В результаті виконаних досліджень створено комплекс програм для ЕС ЕОМ з метою визначення параметрів попереднього пружного деформування пологих циліндричних оболонок при зварюванні жорстких кругових фланців. Вироблені рекомендації по вибору параметрів попереднього пружного вигину. Результати, отримані в роботі, використані при проектуванні силового оснащення і вибору величини деформації при використанні методу попереднього пружного вигину на Міаському і Південному машинобудівних заводах.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: II конференції молодих вчених і спеціалістів ІЗЗ ім.С.О. Пятна АН України ( м. Київ, 1988 р. ), на III Всеукраїнському симпозиумі "Технологические остаточные напряжения" ( м. Кутаїсі, 1988 р. ), на Міжнародній конференції, присвяченій 120-річчя з дня народження С.О. Пятна ( м.Київ, 1990 р. ), на науковій нараді "Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций" ( м. Канів, 1992 р. ), на XVIII конференції молодих вчених Інституту механіки АН України ( м. Київ, 1993 р. ), на семінарі відділу оптимізації зварних конструкцій нової техніки Інституту електрозварювання АН України, на семінарі по зварних конструкціях і технічній діагностиці того ж інституту, на семінарі по механіці суцільного середовища кафедри прикладної математики Сімферопольського держуніверситету.

Публікації. По матеріалам дисертаційної роботи опубліковано 7 друкованих робіт.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, 4-х глав, висновків та списку літератури. Робота викладена на 136 сторінках машинописного тексту, містить 28 малюнків та 5 таблиць. Список літератури налічує 182 назви.

### Короткий зміст дисертації.

У вступі дано обґрунтування актуальності питань, вирішенню яких присвячена дисертація, сформульована ступінь наукової новизни результатів, що отримані в роботі, а також сформульовано основні положення, що виносяться на захист.

В першій главі дисертації приводиться огляд методів розрахунку залишкового напружено-деформованого стану при зварюванні кругових швів в випадку пластини і сферичної оболонки. Виділяються методи розрахунку, що основані на використанні функції усадки, а також методи, що використовують математичний апарат теорії термопластичності. Сучасний математичний апарат, а також поява швидкодіючих ЕОМ зробили можливим врахувати фізико-механічні процеси при зварюванні. Це дозволило дослідити кінетику процесу нагрівання і охолодження навколшовної області при зварюванні.

Також дається огляд технологічних засобів зменшення залишкових переміщень при зварюванні кругових швів у сферичних і циліндричних

оболонках. Показано ефективність застосування методу попереднього пружного вигину стосовно сферичних оболонок.

При пружному вигині околиці кругового отвору в циліндричній оболонці навантаження передається по лініях концентричних кіл, одне з яких співпадає з границею отвору. Дія штампів, що передають навантаження на оболонку, має контактний характер. У зв'язку з цим дається огляд методів розрахунку суцільної циліндричної оболонки при дії навантажень, розподілених по лініях напрямної або твірної, а також в випадку контактного характеру взаємодії жорстких штампів з поверхнею циліндричної оболонки.

Приводиться огляд робіт, присвячених експериментальним дослідженням напружено-деформованого стану циліндричних оболонок з вирізами на бічній поверхні.

В кінці глави сформульовано мету дисертаційної роботи, розв'язувані задачі, обґрунтовано вірогідність отриманих результатів, вказано на практичну цінність роботи.

В другій главі розглянуто побудову розв'язків сформульованих задач. У зв'язку з характером задач, які розглядаються, приведено основні співвідношення лінійної теорії циліндричних оболонок з великим показником змінності напружено-деформованого стану, що приводяться до відомого розв'язувального диференціального рівняння відносно комплексного прогину  $\tilde{W}$

$$\Delta \tilde{W} + \frac{1}{cR} \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial x^2} = 0, \quad (I)$$

де:  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $c = \frac{h}{\sqrt{12(1-\nu^2)}}$ ,

R - радіус оболонки.

Розв'язок рівняння (I) в випадку, коли відмінна від нуля поперечна складова  $F_z$  головного вектора зовнішніх сил, що прикладені до границі отвору, отримано В. М. Чеховим і має вигляд:

$$\tilde{W} = \frac{I}{Eh^3} \cdot \left[ \sum_{n=0}^{K-1} (-1)^n \cdot \left( \tilde{A}_n^{(1)} \cdot H_n^{(1)}(\alpha r) + \tilde{A}_n^{(2)} \cdot J_n(\alpha r) \right) \cdot \cos(n\theta) \frac{\cos(\alpha x)}{\sin(\alpha x)} - \frac{I}{2} R \cdot F_z \cdot \frac{1r^2}{4Ch} \cdot \sum_{k=0}^{L-1} \ln(H_1^{(1)}, J_{2k}) \cdot \frac{s_k (-1)^k}{4k^2 - 1} \cdot \cos(2k\theta) \right]. \quad (2)$$

де:  $J_n(\alpha r)$ ,  $H_n^{(1)}(\alpha r)$  - циліндричні функції Бесселя 1

Ханкеля комплексного аргументу  $\alpha r$ ,  $\alpha = (I+i)\beta$ ,  $\beta = \frac{I}{\sqrt{cR}}$ .

$W(H_1^{(1)}, J_{2k})$  - Вронскіан,  $e_k = \begin{cases} 1, & k \neq 0 \\ I/2, & k=0 \end{cases}$ .

Верхні співмножники в (2) беруться при парних  $n=2s$ , а нижні - при непарних  $n=2s+1$  ( $s=0,1,2,\dots$ ).

Потрібно визначити напружено-деформований стан поголої циліндричної оболонки при контактній взаємодії двох жорстких кільцевих штампів з поверхнею оболонки по лініях концентричних кіл, одна з яких співпадає з контуром кругового отвору. При розв'язанні контактної задачі як допоміжна розглядається задача про напружений стан поголої циліндричної оболонки, навантаженої двома однаковими і протилежно напрямленими поперечними силами, що розподілені по заповненому закону вздовж границі кругового отвору і вздовж концентричного з ним кола.

Пропонований спосіб розв'язання задачі полягає в наступному. По лінії кіл, вздовж яких прикладено навантаження, оболонка умовно розрізається. Поперечне навантаження задається у вигляді стрибка узагальнених перерізуючих сил, що прикладені до колових границь з'єднаних областей. Отримані в результаті розрізання області зшиваються по зусиллях, моментах і деформаціях.

З метою апробації методу спочатку розв'язано задачу для суцільної поголої циліндричної оболонки.

Розглядається задача про напружений стан поголої циліндричної оболонки при дії сил  $P_1$ ,  $P_2$ , що розподілені по лініях двох концентричних кіл  $r=r_1$  і  $r=r_2$ . На поверхні оболонки утворяться три області: вставки, де  $0 \leq r \leq r_1$ ; кільця, коли  $r_1 \leq r \leq r_2$ ; оболонки, коли  $r_2 \leq r$ . В області вставки розв'язок береться тільки в функціях Бесселя, в області кільця повністю співпадає з виглядом (2), а в області оболонки тільки - в функціях Ханкеля. По лініях зшивання областей між собою  $r=r_k$  ( $k=1,2$ ) розв'язки поєднуються по зусиллях, моментах і деформаціях, а для перерізуючої сили задається стрибок, рівний величині прикладених навантажень  $P_1(\theta)$  і  $P_2(\theta)$ . При  $r=r_k$ ,

$$\begin{aligned}
T_r^{(k)}(\varphi) &= T_r^{(k+1)}(\varphi), & G_r^{(k)}(\varphi) &= G_r^{(k+1)}(\varphi), \\
S_{r\vartheta}^{(k)}(\varphi) &= S_{r\vartheta}^{(k+1)}(\varphi), & Q_r^{*(k)}(\varphi) &= Q_r^{*(k+1)}(\varphi) + P_k(\varphi), \\
\alpha_\vartheta^{(k)}(\varphi) &= \alpha_\vartheta^{(k+1)}(\varphi), & \alpha_{r\vartheta}^{(k)}(\varphi) &= \alpha_{r\vartheta}^{(k+1)}(\varphi), \\
\alpha_\vartheta^{(k)}(\varphi) &= \alpha_\vartheta^{(k+1)}(\varphi), & \alpha_{n\vartheta}^{(k)}(\varphi) &= \alpha_{n\vartheta}^{(k+1)}(\varphi), \quad k=1, 2.
\end{aligned} \quad (3)$$

Додатково, в області кільця, ставиться умова однозначності тангенціальних переміщень

$$\operatorname{Im} \sum_{n=0}^{K-1} \tilde{G}_n^{(1)} = 0, \quad (4)$$

де  $\tilde{G}_n^{(1)}$  зв'язані з постійними  $\tilde{A}_n^{(1)}$  рекурентними співвідношеннями

$$\begin{aligned}
\tilde{G}_n^{(1)} &= \tilde{A}_{n-1}^{(1)} - 2\tilde{A}_n^{(1)} + \tilde{A}_{n+1}^{(1)}, \quad (n \neq 0), \\
\tilde{G}_0^{(1)} &= -2\tilde{A}_0^{(1)} + \tilde{A}_1^{(1)}
\end{aligned} \quad (5)$$

В області оболонки ставиться умова рівності нулю головного вектора зовнішніх сил, прикладених до контуру  $\Gamma = \Gamma_2'$  ( $\Gamma_2' > \Gamma_2$ )

$$\operatorname{Re} \sum_{n=0}^{K-1} \tilde{G}_n^{(1)} = 0, \quad (6)$$

Граничні умови (3) задовільняються методом граничної колюкації в скінченному числі точок на контурах  $\Gamma = \Gamma_1$ ,  $\Gamma = \Gamma_2$ . З врахуванням умов (4), (6) одержується система лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих комплексних констант. Система рівнянь формується і розв'язується при допомозі ЕОМ. При цьому контролюється точність виконання граничних умов між точками колюкацій. При необхідності кількість точок збільшується. Досліджено напружено-деформований стан оболонки при рівномірному розподілі сил  $P_1$ ,  $P_2$  і при розподілі цих сил по закону  $\cos(4\varphi)$ .

При постановці задачі про дві жорстких кільцевих концентричних штампів припускається, що поверхня оболонки не відстає від підстави штампів. На нормальні переміщення накладається умова  $\Gamma$

постійності по лініях контакту штампів з оболонкою:

$$W(\vartheta)|_{r=r_1} = C_1, \quad W(\vartheta)|_{r=r_2} = C_2, \quad \vartheta \in [0, 2\pi], \quad (7)$$

де  $C_1, C_2$  невідомі константи.

Умова (7) по лініях контакту задовольнялася при допомозі лінійної комбінації розв'язків допоміжних крайових задач

$$W(r, \vartheta) = W_0(r, \vartheta) + \sum_{k=0}^{M-1} B_k \cdot W_k(r, \vartheta) + \sum_{l=0}^{M-1} D_l \cdot W_l(r, \vartheta), \quad (8)$$

де  $W_0(r, \vartheta)$  - прогин, який відповідає рівномірному розподілу навантажень по лініях контакту;  $W_k(r, \vartheta), W_l(r, \vartheta)$  - прогини при навантаженні, розподіленому по закону  $\cos(2k\vartheta)$  і  $\cos(2l\vartheta)$  по лініях контакту  $r=r_1$  і  $r=r_2$  відповідно.

Умова (7) задовольнялася на скінченній множині точок, кількість яких перевищувала  $2M$ . Перевизначена система лінійних алгебре-

ічних рівнянь відносно постійних  $B_k, D_l$  ( $k, l=0, M-1$ ) розв'язувалась методом найменших квадратів. Комплексні константи  $A_n$  визначаються шляхом підстановки  $B_k$  і  $D_l$  в матричне рівняння вигляду:

$$\vec{A} = \vec{A}_0 + A_1 \cdot \vec{B} + A_2 \cdot \vec{D}. \quad (9)$$

Тут  $\vec{A}$  - вектор-стовпець, що складається з комплексних констант  $A_n$  і відповідає розв'язкові контактної задачі (7), (8);  $A_0$  - розв'язок при рівномірному розподілі навантажень по лініях контакту;  $A_1, A_2$  - матриці, що відповідають розв'язкам, коли навантаження розподілені по закону  $\cos(2k\vartheta)$  і  $\cos(2l\vartheta)$  вздовж відповідних ліній контакту.

Чисельні дослідження розв'язку контактної задачі виконано для таких значень радіусів штампів:  $r_1 = 1.5 \cdot \sqrt{Rh}$  і  $r_2 = 2.1 \cdot \sqrt{Rh}$ .

Виконані дослідження для суцільної пологої оболонки дозволяють перейти до розв'язання задачі про напружено-деформований стан оболонки з круговим отвором при попередньому кружкому вигині.

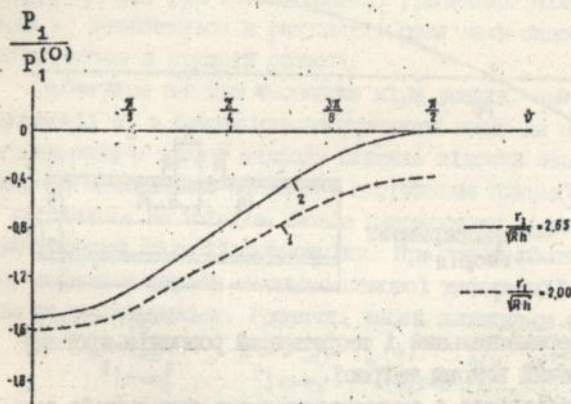
Як і для суцільної пологої циліндричної оболонки, з метою побудови розв'язку контактної задачі, спочатку розглядається задача для оболонки з круговим отвором при дії навантажень, розподілених по заданому закону вздовж контуру отвору і концентричному йому ко-

ду. Граничні умови задаються вздовж контуру отвору як задані значення нормальних і зсувних зусиль, моменту і узагальноної перерізуючої сили. По лінії умовного розрізу оболонки на області кільця і оболонки, ставляться умови сполучення (3) вказаних областей по зусиллях, моментах деформаціях. Узагальнена перерізуюча сила задається зі стрибком, рівним величині прикладених навантажень. На комплексні константи в області кільця і оболонки ставляться умови (4), (6) відповідно. В результаті розв'язку задачі досліджено напружено-деформований стан пологої циліндричної оболонки при рівномірному розподілі сил  $P_1$  і  $P_2$  вздовж кругового отвору і концентричного йому кола.

Алгоритм побудови контактної розв'язку подібний розглянутому вище для суцільної оболонки. Внутрішній штамп діє вздовж контуру отвору  $r=r_1$ .

Досліджено контактну взаємодію штампів з оболонкою, коли вони діють вздовж контуру кругового отвору  $r_1=2\cdot\sqrt{Rh}$  і кола  $r_2=2.65\cdot\sqrt{Rh}$ .

Розподіл контактної тиску вздовж ліній  $r=r_1$  і  $r=r_2$  має наступний вигляд:



Мал. I. Розподіл контактних тисків:

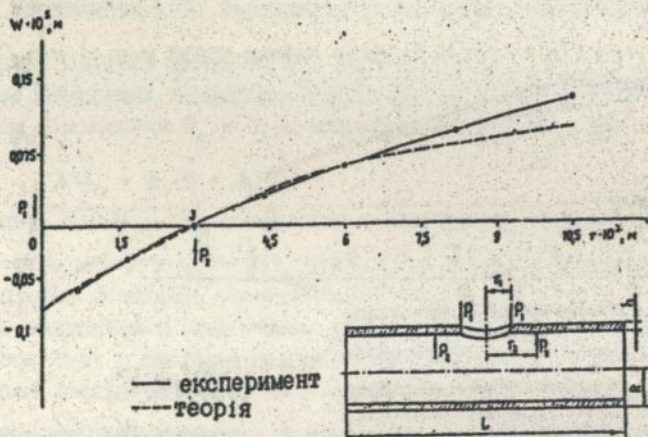
1 - вздовж контуру отвору  $r_1=2\cdot\sqrt{Rh}$ .

2 - вздовж кола  $r_2=2.65\cdot\sqrt{Rh}$ .

По осі абсцис відкладено полярний кут, а по осі ординат – контактний тиск, віднесений до рівномірно розподіленого тиску  $P_1^{(0)}$ .

Характер розподілу контактних тисків по лініях дії внутрішнього і зовнішнього штампів близький. Максимуми досягаються вздовж твірної, а мінімуми вздовж напрямної.

В третій главі дисертації представлені основні співвідношення голографічної інтерферометрії. Описано методику експериментальних досліджень нормальних переміщень поверхні оболонки при пружному вигині околиці кругового отвору методом голографічної інтерферометрії. При проведенні експерименту використовувалась схема в зустрічних пучках, вперше запропонована Е.Б. Александровим. Співставлено величину прогину вздовж твірної, виміряної методом голографічної інтерферометрії, з прогином, отриманим теоретичним шляхом ( мал.2. ).



Мал. 2. Експериментальний і теоретичний розподіл прогину оболонки вздовж твірної.

З порівняння теоретичних і експериментальних результатів випливає, що дані розреканку добре погоджуються з експериментальними в зоні вигину і поблизу неї. Зростання відмінності між результатами при віддаленні від області дії навантажень можна пояснити впливом країв оболонки.

Четверта глава дисертації присвячена розробці наближеної математичної моделі для визначення залишкового прогину пологої циліндричної оболонки при ввариванні жорсткого кругового фланця, дослідженні впливу ширини зони вигину на напружено-деформований стан оболонки при пружному вигині, а також рекомендацій по застосуванню методу попереднього пружного вигину.

Наближена математична модель визначення залишкового прогину побудована з припущенням одночасності заповнення зварного шва і того, що ввариваний фланець жорсткий. Виникнення залишкового прогину зв'язується з дією подовжніх і поперечних усадок. В якості подовжніх і поперечних усадок розглядається колово і радіальна деформація відповідно. В силу жорсткості кругового фланця, його деформованість будемо зневажати. Отже, процес формування залишкового прогину будемо розглядати в області оболонки.

Граничні умови ставляться в деформаціях вздовж лінії кола  $r=r_1$ , що проходить через точки, що відповідають центру зварного шва. Така форма задання граничних умов передбачає, що задається колово деформація  $\epsilon_\theta$  і величини  $\kappa_\theta$ ,  $\kappa_{r\theta}$ ,  $\kappa_{\theta n}$ . Де  $\kappa_\theta$  - характеризує викривлення нормального елемента в своїй площині,  $\kappa_{\theta n}$  - з площини,  $\kappa_{r\theta}$  - скручування елемента,  $\epsilon_\theta$  - відносне подовження вздовж контуру отвору. При такому заданні граничних умов, радіальна деформація  $\epsilon_r$  визначається в результаті розв'язку задачі. Для усадки шва розглядається в пружній області.

Критерієм задання величини міри усадки, як величини колової деформації  $\epsilon_\theta$  є близькість напруженого стану до стану пластичності. Обґрунтуванням такого підходу служить відомий експериментальний факт, що максимальні залишкові напруження близькі до межі текучості  $\sigma^T$  зварених матеріалів. Поява пластичності оцінюється по критерію потенціальної енергії формозміни. При такій постановці граничних умов задається пружна складова колової деформації. Пластична складова не розглядається. Граничні умови запишуться в вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_\theta^{(e)} &= \epsilon_\theta^{(0)} \\ \kappa_\theta^{(e)} &= 0 \\ \kappa_{r\theta}^{(e)} &= 0 \\ \kappa_{\theta n}^{(e)} &= 0 \end{aligned} \right|_{r=r_1} \quad (10)$$

Величина колової деформації припускається постійною вздовж лінії кругового шва. Нульові значення величин  $\kappa_\theta^{(e)}$ ,  $\kappa_{r\theta}^{(e)}$ ,  $\kappa_{\theta n}^{(e)}$  можна трактувати як умову поєднання фланця з оболонкою по товщині.

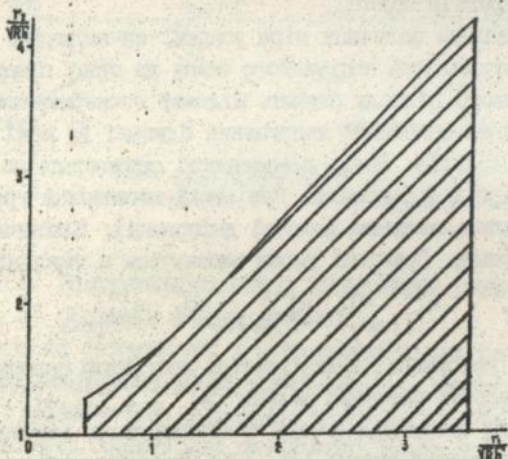
Розв'язок граничної задачі (I), (10) предствляється в функ-

$$W = \frac{I}{EhC} \sum_{n=0}^{K-1} (-1)^n \cdot \tilde{A}_n^{(1)} \cdot H_n^{(1)}(\alpha r) \cdot \begin{matrix} \cos \alpha X \\ \sin \alpha X \end{matrix} \quad (\text{II})$$

Невідомі комплексні постійні  $\tilde{A}_n^{(n)}$  визначаються методом граничної коллокації. Система лінійних алгебраїчних рівнянь доповнюється умовою однозначності перемішень виду (4).

Числові дослідження виконано для наступних значень радіусів фланця:  $r_1/\sqrt{Rh} = 0.5; 2; 3.5$ .

Використовуючи викладений в другій главі дисертації алгоритм, вивчено вплив ширини зони вигину на напружено-деформований стан оболонки з круговим отвором при попередньому пружному вигині. Збільшення ширини зони вигину приводить до більшої нерівномірності в розподілі контактного тиску по лініях дії зовнішнього штаму. Проаналізовано вплив ширини зони вигину на характер розподілу мембранних напружень і напружень згину. Побудовано критичну криву в координатах  $(r_1/\sqrt{Rh}, r_2/\sqrt{Rh})$ , де  $r_1, r_2$  - кола, вздовж яких діє внутрішній і зовнішній штамп відповідно ( мал. 3 ).



Мал. 3. Зентрикована область характеризує зону відсутності відставання штампів.

Дана крива характеризує граничну ширину зони вигину при якій ще немає відставання зовнішнього штампу від оболонки. Якщо точка попадає в нижню частину графіку (затрихована область) або на криву, то відставання немає.

Опираючись на розроблений метод розрахунку прогину при попередньому пружному вигині і наблизивши математичну модель визначення залишкового прогину, формулюється методика вибору параметрів попереднього пружного вигину при звариванні жорсткого кругового фланця.

Вибір параметрів попереднього пружного вигину здійснюється виходячи з рівності максимальних переміщень від пружного вигину і усадки, що викликана зваривальним нагріванням, а також обмеження на максимальні еквівалентні напруження.

$$W_{\text{MAX}}^{(\text{ВІГ})} = W_{\text{MAX}}^{(\text{ЗВ})} \cdot \sigma_{\text{ЕКВ}}^{\text{MAX}} \leq \sigma^T \quad (12)$$

Для визначення величин максимальних нормальних переміщень в залежності від  $r_1/\sqrt{Rh}$  (де  $r_1$  - радіус отвору або радіус звариваного фланця) побудовано графічні залежності. Задавши модуль пружності матеріалу  $E$ , радіус оболонки  $R$  і максимальні еквівалентні напруження  $\sigma_{\text{ЕКВ}}^{\text{MAX}}$ , визначається відповідна величина максимального прогину. В випадку визначення максимального залишкового прогину величина  $\sigma_{\text{ЕКВ}}^{\text{MAX}}$  покладається рівною межі текучості  $\sigma^T$ , а при попередньому пружному вигині визначається величиною прикладеного до контуру отвору головного вектора зовнішніх сил. Місце прикладання зовнішнього штампу визначається при допомозі критичної кривої ( мал.3. ).

У висновку сформульовано основні результати, що отримані в роботі і полягають у наступному:

1. В результаті виконаних досліджень вперше розроблено методику дослідження напружено-деформованого стану пологої циліндричної оболонки при попередньому пружному вигині околиці кругового отвору.
2. В процесі побудови алгоритму розрахунку напружено-деформованого стану пологої циліндричної оболонки при попередньому пружному вигині вперше роз'язано задачу про дію:
  - протилежно спрямованих сил, розподілених по лініях двох кон-

центричних кіл на поверхні оболонки;

- протилежно спрямованих сил, розподілених по границі кругового отвору 1 по лінії концентричного їй колу;
- двох жорстких кільцевих штампів на поверхні циліндричної оболонки при наявності кругового отвору 1 без нього.

- Здійснено експериментальну перевірку методом голографічної інтерферометрії результатів розрахунку прогину оболонки вздовж твірної оболонки. Розрахункові і експериментальні значення прогинів при попередньому пружному вигині добре узгоджуються в околиці прикладених навантажень.
- Побудовано наближену математична модель для визначення залишкового прогину циліндричної оболонки при ввариванні жорсткого кругового фланця.
- Створено комплекс прикладних програм на мові Фортран для ЕС ЕОМ і для ІВМ РС, що реалізують розроблені алгоритми. Проведені числові дослідження.
- В результаті розв'язку перерахованих вище задач виявлено наступні основні закономірності:
  - при збільшенні ширини зони вигину контактний тиск під зовнішнім штампом прямує до нуля при  $\epsilon$ , близькому до  $\frac{\pi}{2}$ . Подальше збільшення зони вигину спричиняє відставання поверхні оболонки від штампів;
  - побудовано критичну криву, що характеризує граничну ширину зони вигину, при якій ще немає відставання поверхні оболонки від штампів;
  - прогини оболонки по напрямній в більшій мірі зменшуються в порівнянні з твірною при віддаленні від зони прикладання навантажень.
- З приведених графічних залежностей випливає, що максимальний залишковий прогин компенсується повністю величиною максимальних нормальних переміщень від попереднього пружного вигину, коли  $0.5 \leq r_1 / \sqrt{Rh} \leq 1.625$ .

Публікації. Основні результати дисертації викладено в наступних роботах:

- І. Кротенко П. Д. Моделирование на ЭВМ напряженно-деформированного состояния при предварительном упругом изгибе цилиндрической

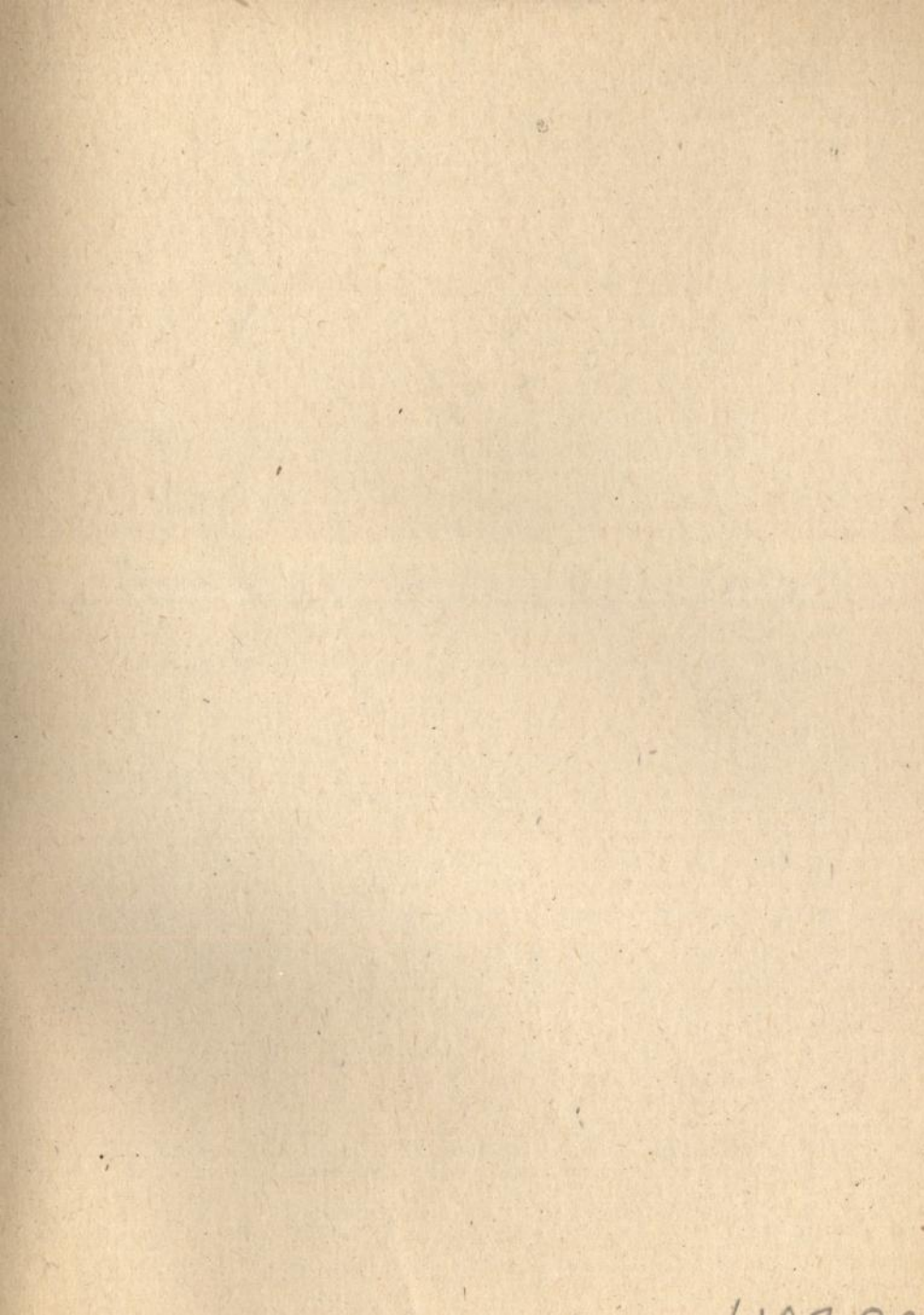
- оболочки с круговым отверстием с целью автоматизации процесса сварки круговых фланцев // Тез. докл. II конф. молодых ученых и специалистов. - Киев: ИЭС, 1988. - с. III-IV.
2. Лобанов Л.М., Махненко В.И., Кротенко П.Д. и др. О параметрах предварительного упругого выгиба применительно к сферическим оболочкам // Автомат. сварка, 1988, №9, с. 1-4.
  3. Лобанов Л.М., Чехов В.М., Кротенко П.Д. Расчет напряженного состояния в цилиндрической оболочке при упругом изгибе, компенсирующем остаточные перемещения при сварке круговых фланцев // Материалы III Всес. симпозиума "Технологические остаточные напряжения." - М.: 1988, с. 251-256.
  4. Лобанов Л.М., Чехов В.М., Кротенко П.Д. Контактна взаємодія твердих кільцевих штампів з положов циліндричною оболочкою, посибленим круговим отвором // Доп. АН УРСР. Сер. А., 1990, №9, с. 38-41.
  5. Чехов В.М., Кротенко П.Д. Определение параметров выгиба окрестности кругового выреза под фланец в цилиндрической оболочке с целью уменьшения остаточных сварочных деформаций // Сварные конструкции. Тез. докл. Международной конф., посвященной 120-летию Е.О. Патона. - Киев, 1990. - с. 131-132.
  6. Лобанов Л.М., Кротенко П.Д., Чехов В.М. Математическое моделирование остаточных прогибов тонкой цилиндрической оболочки при сварке жестких круговых фланцев и метод их устранения // Тез. докл. научного совещания "Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций". - Киев: 1992, с. 47.
  7. Кротенко П.Д. Контактне взаємодія жестких кольцевых штампов с цилиндрической оболочкой в окрестности кругового отверстия // Тр. ХУІІІ конф. мол. ученых Ин-та механики АН Украины, 18-21 мая 1993 г. Ч. I / Ин-т мех. АН Украины. - Киев, 1993 - с. 63-67. Доп. в ГНТБ Украины №1764 - Ук93.

*Handwritten signature*

Підп. до друку 29.10.93. Формат 60x84/16. Пап офс. № 2. Офс. друк.  
Ум. друк. вк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,16. Обл.-вид. вк. 0,88.  
Тираж 110 прим. Зам. 480. Безкоштовно.

---

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



Безкоштовно

**AV 28.536**