

УДК 539.3

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ГНУЧКИХ ОБОЛОНОК СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

*кандидат технічних наук, Костира Н.О.  
Національний авіаційний університет, Київ*

В класі гнучких тонких оболонок найбільшу гнучкість в межах пружності мають оболонки обертання під назвою «сильфони» - тонкостінні труби з кільцевими гофрами (рис. 1). Конструкція сильфона у разі достатньої кількості гофрів допускає практично необмежені лінійні та кутові переміщення [1]. Конструкції сильфонів мають широке застосування в приладобудуванні - як чутливі елементи, що отримують видовження при зміні тиску, а також при прокладанні магістральних трубопроводів різноманітного призначення, як податливі елементи, включені до трубопроводу для компенсації переміщень чи поворотів.

В статті розглянуто другий випадок конструктивної реалізації гнучких просторових оболонок складної конфігурації, де мають місце великі переміщення та великі деформації [1, 2, 3, 4]. Конструкції компенсаторів бувають двох типів: лінзові сильфонні та трубчасті (рис. 2), що являють собою тороподібну оболонку з круговою чи близькою до цього формою меридіана. Для дослідження напружено-деформованого стану конструкцій лінзових сильфонних компенсаторів розглядаємо дві задачі нелінійного деформування гнучких тонких оболонок:

- 1) дія рівномірно розподіленого внутрішнього (надлишкового) тиску з жорстко закріпленими краями компенсаторів;
- 2) дія внутрішнього надлишкового тиску та осьових сил на граничних перерізах.

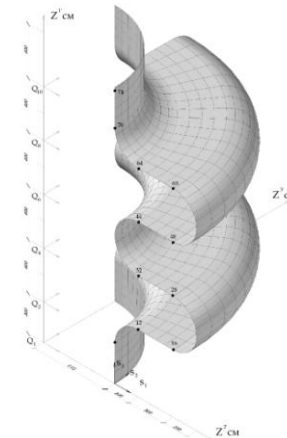


Рис. 1. Розрахункова схема оболонки лінзового компенсатора

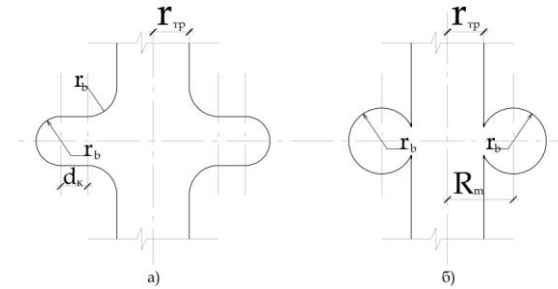


Рис. 2. Конструктивна схема компенсаторів: а) – лінзовий компенсатор; б) – трубчастий компенсатор

На відміну від існуючих підходів аналітичних та чисельних розрахунків оболонкових конструкцій компенсаторів у запропонованому підході чисельний розрахунок та оптимальне проектування сильнонелінійних оболонок здійснюється на основі моментної схеми скінченних елементів за граничним напруженим станом при умові обмеження розвитку зон локальних пластичних деформацій. В існуючих методиках [1, 3, 4] застосовують розрахункові схеми, що не враховують початкових деформацій торових або напівторових фрагментів компенсаторів, при цьому міцність оцінюється за допустимим напруженням, а не за кривою розвитку «напруження – деформація» з урахуванням зміцнення матеріалу оболонки. Таким чином, нормативні показники конструкцій компенсаторів: ресурс, гарантована кількість циклів роботи компенсатора, осьова (питома) жорсткість компенсатора (розтяг-стиск), ефективна площа та інші геометричні параметри є заниженими.

В результаті при проектуванні конструкцій компенсаторів мають місце необґрунтовано великі запаси елементів конструкцій.

Для отримання оптимальної конструкції компенсатора для заданого магістрального газопроводу великого діаметра з високим внутрішнім надмірним тиском до 7,5 МПа розв'язано задачу оптимізації форми та структури двох типів компенсаторів – трубчастого та сильфонного багатолінзового. Під час розв'язання задачі розроблений єдиний підхід, що поєднує методи розрахунку міцності за граничним станом та прямий пошуковий метод оптимізації форми та структури конструкції компенсатора з обмеженнями за міцністю та узагальненими параметрами проектування [5, 2, 6].

Математична модель задачі має такий вигляд:

- цільова функція:

$$f(b, u) \equiv \sigma_{\max}^{3(u, z)}(b, u) \rightarrow \min; \quad (1)$$

- обмеження у вигляді рівностей (система нелінійних рівнянь рівноваги):

$$h_k(b, u) = 0; \quad (2)$$

- обмеження у вигляді нерівностей:

$$\max \sigma \left( \begin{matrix} * \\ \vec{b}, u \end{matrix} \right) \leq |\sigma_T|; \quad (3)$$

$$\{b^0\} \geq \{b^*\} \geq \{b^k\}; \quad (4)$$

$$\frac{3}{2} I_1(\hat{S}^2) \cos^2 \alpha - \sigma_s^2 \leq 0; \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \arcsin \left[ -\sqrt{6} \frac{I_1(\hat{S}^3)}{I_1^{3/2}(\hat{S}^2)} \right]; \quad (6)$$

де  $\{b\} = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$  - вектор змінних проектування;  $\{u\} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  - вектор змінних стану (прирости переміщень);  $\hat{S}$  - тензор-девіатор функції напружень,  $\alpha$  - параметр Лоде (зворотна тригонометрична функція від другого і третього інваріантів тензора  $\hat{S}$ );  $\sigma_s$  - інтенсивність напружень матеріалу конструкції компенсатора.

Початкова форма конструкцій трубчастого й сильфонного компенсаторів описана канонічними рівняннями поверхонь оболонок обертання, що включають фрагменти тора, циліндра, кільця горизонтального та під нахилом - поверхня коноїда.

Число параметрів структури сильфонної оболонки кратне числу гофр або лінз. При обмеженому числі узагальнених параметрів проектування  $\{b_i\}, i = 6-10$ , найбільш ефективними (у разі сильної нелінійності обмежень у вигляді рівностей) є пошукові методи (методи прямої оптимізації) [5, 2, 7], засновані на обчисленні значень цільової функції для даного вектора значень параметрів проектування, послідовність їх зміни реалізується згідно з рекурентної формули:

$$\vec{b}^{t+1} = \vec{b}^t + \delta \vec{b}^t, \quad t = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (7)$$

де  $t$  - номер ітерації прямого пошуку;  $\delta \vec{b}^t$  - величина зміни вектора параметрів проектування.

Суть методів прямого пошуку полягає у змінюванні щоразу однієї змінної (однієї компоненти незалежного вектора  $\vec{b}$ ), тоді як інші залишаються сталими, доки не буде досягнутий мінімум цільової функції. У зв'язку з обмеженим числом змінних проектування в роботі застосовується алгоритм оптимального прямого пошуку Хука і Дживса [2], що для конкретної задачі оптимального проектування конструкції компенсатора має наступний вигляд. Алгоритм складається з двох основних етапів:

1) «дослідницький пошук» в околі базової точки при  $t=0$  (початкова точка);

2) «пошук за зразком», тобто у напрямку найбільшого зниження до мінімального значення цільової функції.

Окрім зазначених двох основних етапів пошуку за Хуком-Дживсом, надзвичайно важливим є підготовчий етап оптимізації, особливо під час

використання дискретних моделей конструкцій, що проектуються, та їх чисельної реалізації, який визначає базову точку пошуку і границі збурення незалежних компонент вектора параметрів проектування. Це обумовлено ще й тим, що для сильнонелінійної конструкції [5, 6, 8] задача оптимального проектування, окрім змінних параметрів проектування, включає також і змінні стану (див. математичну модель (1) -(6)), які необхідно враховувати інженеру під час задавання базисних значень параметрів проектування. Визначальний стан механічної системи залежить від вдало вибраних початкових значень параметрів проектування, що залежать від змінних стану, тобто обидві сукупності змінних взаємопов'язані [5].

Для надання алгоритму оптимального пошуку форми задачі нелінійного програмування фактично необхідно ввести нову змінну задачі оптимального проектування [5, 2]:

$$\{z\} = \begin{Bmatrix} u \\ b \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Тоді можна безпосередньо використовувати технологію розв'язання задач нелінійного програмування, що добре узгоджується при формуванні рівнянь у формі приростів при зміні геометрії на кожному кроці подовження.

Для розглянутих вище задач оптимального проектування конструкцій компенсаторів складної конфігурації у разі складного навантаження (внутрішній надмірний тиск, поздовжній і поперечний розтяг-стиск та зовнішній згинальний момент) на попередньому етапі алгоритму оптимального пошуку необхідно розв'язати задачу нелінійного деформування гнучких сильфонних оболонок і за заданими фіксованими параметрами визначити технічні характеристики конструкції, чутливість на різні впливи та необхідні границі основних узагальнених параметрів проектування.

Наприклад, для сильфонного високонапірного нерозвантаженого компенсатора з торо-пластинчастими гофрами необхідно визначити: компенсуючу здатність – граничну величину компенсування зміни довжини трубопроводу, тобто величина стиску або розтягу компенсатора в мм; ресурс компенсатора – гарантоване число робочих циклів  $N$  – число однократних розтягів-стисків магістрального трубопроводу при значній зміні температури зовнішнього середовища або технологічного наповнювача; чутливість щодо жорсткості – сила або момент, необхідні для стиску або розтягу осьового компенсатора на 1мм, або ж згинальний момент при повороті граничного перерізу на  $1^\circ$ ; нормативні геометричні параметри компенсатора для конструктивно-технологічних умов магістральних трубопроводів, що проектуються, умовний тиск – розрахунковий граничний тиск у порожнині компенсатора за  $t \leq 200^\circ C$ , виміряний у МПа; пробний тиск – гранично допустимий тиск під час гідравлічних випробувань.

До розгляду прийняті компенсатори багатолінзові (сильфонні з одним, двома, трьома, чотирма та шести гофрами), а також трубчастий компенсатор, що має певну аналогію з однолінзовим компенсатором з круговою чи еліптичною формами меридіанного перерізу. Оцінка міцності на основі рекомендацій нормативних документів з достатньою для практики точністю

здійснюється за величиною меридіанних згинальних напружень, тому головним критерієм при оптимальному проектуванні компенсаторів слід вважати аналіз функції максимальних меридіанних згинальних напружень, а основне обмеження міцності описане функцією навантаження у граничному напруженому стані гнучкої сильфонної оболонки (1), (5), (6).

Ресурс та компенсуюча здатність сильфонних компенсаторів визначається для одного гофра за формулою:  $\Delta_0 = \Delta_k / n$ , (9)

де  $\Delta_k$  – компенсуюча здатність компенсатора, що має більше ніж один гофр - вільне поздовжнє переміщення при забезпеченні кінематичних граничних умов на краю конструкції компенсатора (фланець патрубка) від надмірного внутрішнього тиску під час нейтрального стану функції навантаження (4.5);  $n$  – число гофрів сильфонної оболонки.

На основі нормативних рекомендацій [9], технічної та наукової літератури [1, 4], а також на основі здійснених попередніх чисельних експериментів [2] визначаємо межі величин можливих змін компонент вектора параметрів проектування конструкції багатолінзового компенсатора магістрального трубопроводу з високим надмірним внутрішнім тиском.

Після завершення алгоритму пошуку проводиться тест, що полягає в аналізі змінних стану, тобто здійснюється перевірка якості напружено-деформованого стану дискретної моделі гнучкої оболонки компенсатора в результаті задоволення обмеження (3): чи наявні там зони пластичного деформування (хоча б в одному скінченному елементі), чи вони відсутні. Якщо локальні зони пластичного деформування мають місце, в такому випадку або змінюються межі компоненти вектора змінного проектування (наприклад вводиться нова, більш в'язка марка сталі, або змінюється  $\{\theta_i^0\}$ ), або ж пошук оптимізації  $n$ -лінзового сильфонного компенсатора триває далі в  $n+1$ -лінзовому варіанті. У прикладах дослідження проведені, починаючи з однолінзового (аналог трубчастого) компенсатора до шести лінзового з використанням марки сталі з максимальною межею текучості  $\sigma_T = 450 - 600 \text{ MPa}$  із зміцненням до  $800 \text{ MPa}$ .

#### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Аксельрад Э. Л. Гибкие оболочки / Эрнест Леонидович Аксельрад. – М.: Наука, 1976. – 376 с.: илл.
2. Цихановський В. К. Несущая способность комбинированных оболочечных конструкций с учётом развития пластических деформаций / В. К. Цихановський, С. М. Козловец, Н. А. Костыра // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2008. – №3. – К.: ВАТ “УкрНДПроектстальконструкція” ім. В.М. Шимановського. – С. 17–21.
3. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек / В. В. Новожилов. – Л.: ГСИСП, 1962. – 431с.
4. Грин А. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды / А. Грин, Дж. Адкинс; пер. с англ. Ю. В. Немировского. – М.: Мир, 1965. – 455 с.

5. Химельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химельблау; пер. с англ. канд. техн. наук В. Н. Сидорова. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
6. Рейклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Рейклейтис, А. Рейвиндран, К. Рехдел. – М.: Мир, 1986. – 346 с.
7. Шимановский А. В. Теория и расчет сильнонелинейных конструкций / А. В. Шимановский, В. К. Цыхановский – К.: Изд-во «Сталь», 2005. – 432 с.
8. Говядко Г. М. Компенсаторы для трубопроводов: [справочник] / Г. М. Говядко, В. И. Есарев, В. Д. Дубчак. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург, 1993. – 183 с.
9. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: [справочник под редакцией акад. Н.П. Мельникова]. – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.

**УДК 539.3**

**ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ГНУЧКИХ  
ОБОЛОНОК СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ / Костира Н.О. //**  
Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов.  
Вып.№62. - Дн-вск, ПГАСА, 2012. – С. - рис.2. - Библиогр.:(9 назв.)