

DIAGNOSIS OF TENSIONS ACCORDING TO THICKNESS OF SHELL STRUCTURES WHICH WORK UNDER PRESSURE

ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНЬ ЗА ТОВЩИНОЮ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

Andrii R. Dziubyk

dar.lviv@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2091-171X

Ihor B. Nazar

nazari@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2592-3592

Vasyl M. Yuskiv

everest658@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9333-6632

А. Р. Дзюбик,

канд. техн. наук, доц.;

І. Б. Назар,

канд. техн. наук, доц.;

В. М. Юськів,

канд. техн. наук, доц.

Lviv Polytechnic National University, Lviv

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Abstract. Tension and deformations which appear in the structures elements have a great impact on their durability, production accuracy and bearing capacity. The aim of this work is to develop the calculation and experimental approach to determine the distribution of circumferential tensions according to the thickness in shell structures. It is important to find the connection between the averaged values of tensions and their distribution according to the thickness using the method of supersonic tensometry to measure the tension state of thick-wall shells. First of all, the solution to the Lamé problem has been written down in order to determine the radial tensions in the cylinder. The inner wall of the cylinder is under the regular pressure. Further, in the result of the integration of this solution within the range from r_{\min} to r_{\max} , the formula has been obtained to determine the average value of tensions according to the wall thickness. The same averaged parameters are obtained after those tensions have been determined by means of the supersonic method. The value the quantity of which one can describe as a coefficient of the K transition from the average integral of circumferential tensions to their real distribution over the wall thickness is obtained in the result of the formulas relation to determine the circumferential tensions. Those numbers are relevant when using the non-destructive methods which carry the information regarding the tension condition of outer layers. The formula is derived to determine the distribution of the circumferential tensions over the wall of thick-wall shells based upon the average integral value of circumferential tension. Using the experimental methods the formulae are obtained to calculate the maximum and minimum values of circumferential tensions.

Keywords: tension, shell structures, supersonic method, circumferential tension.

Аннотация. На основе решения задачи Ламе для определения напряжений в полой цилиндрической оболочке, находящейся под действием равномерного давления на его внутреннюю стенку, получены выражения для вычисления распределения кольцевых напряжений по толщине толстостенных оболочек. Для исследований используются интегральные значения кольцевых напряжений в оболочке, которые определены экспериментально с помощью метода акустической тензометрии.

Ключевые слова: напряжение, оболочечные конструкции, ультразвуковой метод, кольцевые напряжения.

Анотація. На основі розв'язку задачі Ламе для визначення напружень у порожнистому циліндрі, що знаходиться під дією рівномірного тиску на його внутрішню стінку, отримано вирази для обчислення розподілу кільцевих напружень за товщиною товстостінних оболонок. Для досліджень використовуються інтегральні значення кільцевих напружень в оболонці, які визначені експериментально за допомогою методу акустичної тензометрії.

Ключові слова: напруження, оболонкові конструкції, ультразвуковий метод, кільцеві напруження.

REFERENCES

- [1] Bilobran B.S., Dziubyk A.R. Zabezpechennia mitsnosti nadzemnoho perekhodu mahistralnoho truboprovodu iz vrakhuvanniam umov yoho sporudzhennia [Provision of durability of main pipeline overhead taking into account the conditions of its construction]. *10-yi Mizhnarodnyi sympozium ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi* [10th International Symposium of Ukrainian Mechanic Engineers in Lviv]. Lviv, 2013, pp. 22–23.

- [2] Guz A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I. *Vvedenie v akoustouprugost* [Introduction to the acoustoelasticity]. Kyiv, Nauk. Dumka Publ., 1977. 152 p.
- [3] Panasiuk V.V. *Mekhanika ruinvannia i mitsnist materialiv. Tom 8: Mitsnist materialiv i dovhovichnist elementiv konstruktsii atomnykh elektrostants* [Fracture mechanics and strength of materials. Volume 8: Durability of materials and longevity of structural elements of nuclear power plants]. Kyiv, Akadempriodyka Publ., 2005. 544 p.
- [4] Panasiuk V.V. *Mekhanika ruinvannia i mitsnist materialiv. Tom 11: Mitsnist i dovhovichnist naftohazovykh truboprovodiv i rezervuariv* [Fracture mechanics and strength of materials. Volume 11: Strength and durability of oil and gas pipelines and tanks]. Lviv, Spolom Publ., 2009. 504 p.
- [5] Lobanov L.M., Makhnenko V.I., Trufiyakov V.I. et al. *Svarnye stroitelnye konstruktsii. Tom 1: Osnovy proektirovaniya konstruktsiy* [Welded building constructions. Volume 1: Fundamentals of structures design]. 1993. 416 p.
- [6] Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Reference book on the resistance of materials]. Kyiv, Nauk. Dumka Publ., 1988. 736 p.
- [7] Kasatkin B.S. et al. *Eksperimentalnye metody issledovaniya deformatsiy i napryazheniy* [Experimental methods for studying the deformation and tension]. Kyiv, Nauk. Dumka Publ., 1981. 584 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Товстостінні оболонкові конструкції мають широке застосування в промисловості. Перш за все це тепло- та електроенергетична, а також хімічна, машинобудівна, переробна та інші галузі, де мають практичне використання транспортні системи високого тиску [3]. Тут виникнення надзвичайних ситуацій унаслідок руйнування стінок труб супроводжується значними матеріальними та трудовими втратами. Часто виправлення таких дефектів потребує зупинки виробничого циклу з наступним тривалим його відновленням.

Однією з причин виникнення руйнувань є високий рівень напружено-деформованого стану в елементах конструкцій, що впливає на їх утримувальну здатність. При цьому у випадку товстостінних оболонок зміна напружень за товщиною може бути достатньо значною [6], тому важливим є оцінити їх рівень не лише на поверхні, а й у різних серединних перерізах.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У даний час для розв'язання задач із визначення напружень застосовуються різноманітні розрахункові та експериментальні методи. При цьому перші з них здебільшого ґрунтуються на класичних положеннях теорії пружності та містять у своїх підходах певні спрощення. У випадку дослідження конструкцій, що тривалий час перебували в експлуатації, розрахункові методи не завжди забезпечують необхідну точність.

Тому в промисловості широко використовують експериментальні неруйнівні методи [5, 7]. Вони ґрунтуються на вимірюванні деформацій елементів або зміні фізичних характеристик матеріалу конструкцій під дією напружень. Однак використання пристроїв типу електротензорезисторів чи індикаторних деформометрів не дає повної інформації, якщо неможливо врахувати «передісторію» навантажень. Останні в умовах виробництва мають широкий

спектр, часто недетермінованого та імовірного характеру, який змінюється в часі [1]. Тому сьогодні знайшли практичне застосування прилади, які ґрунтуються на вимірюванні фізичних величин матеріалу, зокрема ультразвуковим методом. Він дає змогу визначати напруження в оболонкових конструкціях, якщо відомі пружні константи другого і третього порядків, а також якщо виміряні швидкості розповсюдження хвиль у ненавантаженому і навантаженому станах тіла [2]. Однак даний метод несе інформацію лише про усереднене за товщиною виміряне значення, чого недостатньо у випадку товстостінних елементів. Особливо важливим це є для кільцевих компонент напружень, що виникають в оболонці від внутрішнього тиску. Вони мають завжди розтягальний характер та суттєво перевищують інші складові тензора напружень. У результаті кільцеві напруження є одним з головних чинників, які сприяють зародженню та поширенню повздовжніх відносно осі труби тріщин [4]. Тому актуальним є вдосконалення існуючих методик діагностування та визначення розподілу напружень.

МЕТА РОБОТИ – розробка розрахунково-експериментального підходу до визначення розподілу кільцевих напружень за товщиною в оболонкових конструкціях.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для встановлення зв'язку між кільцевими напруженнями за товщиною матеріалу та їх усередненими значеннями вздовж головних осей використовувався розв'язок задачі Ламе – для товстостінної оболонки, що перебуває під дією рівномірного тиску на його внутрішню стінку [6]. Звідси величина кільцевих напружень

$$\sigma_{\beta\beta} = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right), \quad (1)$$

де p – тиск на внутрішню стінку; r_1, r_2 – внутрішній та зовнішній радіуси оболонки відповідно; r – радіальна

координата (радіус точки, в якій визначаються напруження).

Далі в результаті інтегрування розв'язку (1), в межах від r_1 до r_1 та віднесення його до товщини оболонки отримано величину усередненого за товщиною стінки значення кільцевих напружень $\overline{\sigma_{\beta\beta}}$. Вираз після відповідних перетворень та спрощень набуває наступного вигляду:

$$\overline{\sigma_{\beta\beta}} = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_2^2}{r_1} - r_1 \right) \frac{1}{r_2 - r_1} = p \frac{r_1}{r_2 - r_1}. \quad (2)$$

Ці ж напруження легко визначити із загальної умови рівноваги.

Аналогічні усереднені компоненти напружень отримують ультразвуковим методом. Графічне подання розподілу напружень зображено на рис. 1.

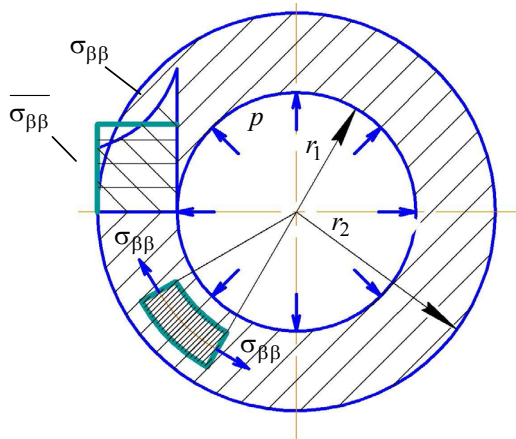


Рис. 1. Розподіл кільцевих напружень за товщиною стінки оболонки

У результаті відношення виразів (1) до (2) отримано формулу для визначення розподілу кільцевих напружень $\sigma_{\beta\beta}$ за товщиною стінки труби, яка знаходиться під дією внутрішнього тиску:

$$\sigma_{\beta\beta} = K \cdot \overline{\sigma_{\beta\beta}}, \quad (3)$$

$$\text{де } K = \frac{r_1(r^2 + r_2^2)}{r^2(r_1 + r_2)}. \quad (4)$$

Тут коефіцієнт K характеризує перехід від експериментально визначеного акустичним методом [2] середньоінтегрального значення кільцевих напружень ($\overline{\sigma_{\beta\beta}}$) до їх реального розподілу.

Для визначення найбільших напружень, які відповідно до формули (1) знаходяться на внутрішній

поверхні оболонки, необхідно зрівняти параметр r до r_1 у виразі (4). В результаті отримано формулу для визначення відповідного коефіцієнта переходу до максимальних напружень:

$$K_{\max} = \frac{r_1^2 + r_2^2}{r_1(r_1 + r_2)}. \quad (5)$$

Аналогічним чином, покладаючи $r = r_2$, після деяких перетворень отримуюмо значення коефіцієнта переходу до мінімальних значень кільцевих напружень на зовнішній поверхні оболонки від експериментального вимірюваного середньоінтегрального значення:

$$K_{\min} = \frac{2r_1}{r_1 + r_2}. \quad (6)$$

Порівняльний аналіз отриманих результатів згідно з виразами (3)–(6) та доступною апріорною інформацією дає змогу встановити наявність напружень у досліджуваній оболонці, які зумовлені іншими технологічними або експлуатаційними чинниками. Також це дозволяє обґрунтувати можливість використання додаткових експериментальних методів, які орієнтовані на вимірювання деформацій та напружень на доступній зовнішній поверхні труби [5, 7].

У процесі експериментального дослідження напружень акустичним методом отримують також величину товщини стінки труби δ . Тоді беручи, що $r = r_2 - \delta$, можна отримати наступні вирази для обчислення K_{\max} та K_{\min} відповідно:

$$K_{\max} = \frac{\delta^2 - 2\delta r_2 + 2r_2^2}{(\delta - r_2)(\delta - 2r_2)}, \quad (7)$$

$$K_{\min} = 1 + \frac{\delta}{\delta - 2r_2}. \quad (8)$$

Це дає змогу автоматизувати процес технічного діагностування шляхом модернізації відповідного програмного забезпечення та зменшити обсяг натурних вимірювань.

ВИСНОВКИ

1. Знайдено вираз для визначення розподілу кільцевих напружень за товщиною стінки товстостінних труб із внутрішнім тиском за результатами експериментального визначення середньоінтегрального значення напружень.

2. Отримано формули для обчислення максимальних та мінімальних значень кільцевих напружень на основі застосування експериментальних методів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Білобран, Б. С. Забезпечення міцності надземного переходу магістрального трубопроводу із врахуванням умов його спорудження [Текст] / Б. С. Білобран, А. Р. Дзюбик // 10-й Міжнар. симп. українських інженерів-механіків у Львові : праці. – Л. : Кінпатрі ЛТД, 2013. – С. 22–23.
- [2] Гузь, А. Н. Введение в акустопругость [Текст] / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуша. – К. : Наукова думка, 1977. – 152 с.

- [3] Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст] : довідник / під заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 8. Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій ; під ред. О. І. Балицького. – К. : Академперіодика, 2005. – 544 с.
- [4] Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст] : довідник / під заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 11. Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів ; під ред. Г. М. Никифорчина. – Л. : Сполом, 2009. – 504 с.
- [5] Сварные строительные конструкции [Текст] : в 3 т. / под общ. ред. Л. М. Лобанова. – Т. 1. Основы проектирования конструкций / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, В. И. Труфяков [и др.]. – К. : Наукова думка, 1993. – 416 с.
- [6] Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд. – К. : Наук. думка, 1988. – 736 с.
- [7] Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений [Текст] : справочное пособие / Б. С. Касаткин [и др.]. – К. : Наукова думка, 1981. – 584 с.

© А. Р. Дзюбик, І. Б. Назар, В. М. Юськів

Надійшла до редколегії 15.05.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Л. І. Коростильов*