

УДК 539.3

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПІДКРІПЛЕННЯ ВИДОВЖЕНОГО ЕЛІПТИЧНОГО ОТВОРУ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ У СФЕРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ

Вадим Гудрамович<sup>1</sup>, Етері Гарт<sup>2</sup>, Олег Марченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут технічної механіки НАН України та Державного космічного агентства України, м. Дніпро;

<sup>2</sup>Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро

Для створення багатьох типів навантажених конструкцій використовуються тонкостінні оболонкові елементи. Дуже часто з практичних міркувань в оболонці повинні бути отвори, які впливають на напружено-деформований стан (НДС) конструкції у цілому. Це спричинює різке збільшення напружень біля отвору, що може призвести до передчасного руйнування конструкції. Вивчення локальних концентраторів НДС оболонок є важливою задачею механіки деформованого твердого тіла [1–4]. Складність математичних моделей обумовлює необхідність використання числових методів.

У цій роботі за допомогою методу скінченних елементів вивчено мінімізацію концентрації параметрів НДС сферичної оболонки, послабленої видовженим еліптичним отвором, за рахунок підбору геометричних і механічних параметрів включення, що оточує отвір.

Розглянуто пружну тонкостінну ізотропну сферичну оболонку радіусу  $R$ , товщини  $h$  з еліптичним отвором ( $a, b$  – піввісі еліпсу), що підкріплюється включенням ширини  $t$  з іншого, ніж основний матеріал оболонки, матеріалу. Вважається, що підкріплювальний елемент змодельовано стрічковою вставкою товщини  $h$ , що відповідає товщині оболонки; на границях включення з оболонкою задані умови жорсткого зчеплення. Оболонка перебуває під дією рівномірного внутрішнього тиску інтенсивності  $p = \text{const}$ .

Результати числового аналізу отримано для оболонки з такими параметрами:  $R = 2 m$ ,  $h = 0.001R$ ,  $b = 0.05R$ . Для визначеності в розрахунках матеріал оболонки має наступні характеристики:  $E_1 = 110$  ГПа,  $\mu_1 = 0.32$ ,  $\sigma_b = 400$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 280$  МПа. Матеріал включення:  $E_2 = 210$  ГПа,  $\mu_2 = 0.3$ ,  $\sigma_b = 630$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 375$  МПа. Вибір матеріалів носить умовний характер. Внутрішній тиск  $p = 10$  МПа.

Досліджено вплив видовженості отвору на НДС оболонки для чотирьох варіантів отворів з таким співвідношенням піввісей:  $a/b = 1.5, 2, 2.5, 3$ . Вплив підкріплювального включення досліджено для отвору  $a/b = 3$  з наступними варіаціями ширини:  $t = 0.1b, 0.2b, 0.3b, 0.4b, 0.5b$ .

При побудові скінченноелементної моделі було використано адаптивну сітку, локально подрібнену в околі отвору з коефіцієнтом подрібнення 10. Порівняння проведено з аналітичним розв'язком для модельної задачі при

співвідношенні піввісей  $a/b = 1.5$  [2]. Отримані результати ККН числового розв'язку збігаються з аналітичним.

Комп'ютерне моделювання щодо впливу підкріплювальних включень на параметри НДС оболонки з отвором в зонах концентрації напружень дозволило прийти до висновку, що наявність більш жорсткого, ніж основний матеріал оболонки, підкріплення дає змогу зменшити інтенсивність деформацій навколо отвору на  $\sim 30\%$ . Концентрація параметрів НДС в значній мірі залежить від ступеня видовженості еліптичного отвору: чим більше співвідношення піввісей отвору, тим більше значення коефіцієнту концентрації напружень. Саме у цих випадках зростає роль підкріплень.

Результати досліджень можуть бути корисні при проектуванні та оптимізації типових елементів конструкцій сучасних галузей техніки, зокрема, ракетно-космічної, а також з урахуванням впливу температурних полів.

1. Гузь А.Н., Чернышенко И.С., Чехов Вал. Н. и др. Методы расчета оболочек. В 5 т. Т. 1. Теория оболочек, ослабленных отверстиями. – Киев: Наук. думка, 1980. – 636 с.
2. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наук. думка, 1968. – 888 с.
3. Hart E.L., Hudramovich V.S. Projection-iterative schemes for the implementation of variational-grid methods in the problems of elastoplastic deformation of inhomogeneous thin-walled structures // J. Math. Sci. – 2021. – **254**, No. 1. – P. 21–38.
4. Hudramovich V. S, Hart E. L, Marchenko O. A. Reinforcing inclusion effect on the stress concentration within the spherical shell having an elliptical opening under uniform internal pressure // Strength of Materials. – 2021. – **52**, No. 6. – C. 832–842.

#### **SIMULATION THE INFLUENCE OF REINFORCEMENT OF AN ELONGATED ELLIPTICAL HOLE ON THE STRESS CONCENTRATION IN A SPHERICAL SHELL**

*Computer schemes for calculating the stress-strain state of spherical shells with reinforced elongated elliptical holes under the action of internal pressure have been developed. The materials of the shells and reinforcements are different. Computer simulation was carried out by the finite element method. The influence of mechanical and geometrical parameters of shell reinforcement on its stress-strain state is investigated. It is shown that a successful choice of the geometric and stiffness characteristics of the reinforcement parameters can significantly reduce the stress concentration in the shell. Regularities of stress and strain intensity distribution in the vicinity of the stress concentrator are constructed. The results obtained in this work can be used to solve optimization problems for thin-walled spherical shells with elongated elliptical holes, having strip reinforcement at the edges, and under the influence of temperature fields.*