

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КІЛЬЦЕВОГО ВКЛЮЧЕННЯ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНОГО МАТЕРІАЛУ НА КОЕФІЦІЄНТ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У ЦИЛІНДРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ З КВАДРАТНИМ ОТВОРОМ

Богдан Терьохін¹, Етері Гарт²

^{1,2}Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро,
¹bogdan.teryokhin@gmail.com; ²hart@ua.fm

У сучасних умовах вимоги до властивостей конструкційних матеріалів стають дедалі жорсткішими. Особливо це стосується матеріалів аерокосмічної техніки, ядерної енергетики, машинобудування та інших галузей, що відрізняються вкрай несприятливими, екстремальними умовами експлуатації відповідальних деталей, елементів конструкцій та агрегатів. З кожним роком функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) все частіше застосовуються в інженерній практиці, оскільки поступова зміна властивостей дозволяє отримати нові матеріали з більш широким спектром застосування в порівнянні з традиційними композитами [1, 3].

Оболонкові відсіки з підкріпленими отворами є типовими для конструкцій ракет-носіїв (РН). Дослідження, що полягають у виборі раціональних типів підкріплень, які забезпечують мінімальні коефіцієнти концентрації напружень (ККН), є актуальними при проєктуванні сучасних РН. Одним із способів зниження концентрації напружень навколо отворів є застосування включень із ФГМ.

У цій роботі на основі методу скінченних елементів проведено комп'ютерне моделювання поведінки тонкостінної циліндричної оболонки довжини L , діаметру d з центрально розташованим квадратним отвором зі стороною $2c$ та кільцевим радіально-неоднорідним включенням радіусу R_1 за дії одновісного рівномірного навантаження розтягу $p = \text{const}$, що не призводить до появи пластичних деформацій. Вважалося, що включення змодельоване вставкою, яка має однакову з оболонкою товщину; на межі включення із матрицею задані умови ідеального механічного контакту.

У числових розрахунках вибрано модельний матеріал з коефіцієнтом Пуассона $\nu_0 = 0,25$ та змінним модулем пружності ФГМ-включення. Як показано у [2], для зниження концентрації напружень доцільно використовувати закон зміни модуля пружності ФГМ-включення з трьома характерними зонами: 1) зона зростання ширини h_1 ; 2) зона незмінного (фіксованого) значення ширини h_2 ; 3) зона зменшення модуля пружності ширини h_3 . У розрахунках прийнято, що модуль пружності оболонки $E_0 = 100 \text{ ГПа}$; коефіцієнт відносної жорсткості ФГМ-включення $k=2, 3, 4$ (k – відношення модуля

пружності другої зони ФГМ-включення E_2 ($E_{\max}^{вкл}$) до модуля пружності оболонки E_0). Ширину ФГМ-включення варіювали: $h_{вкл} = 3c, 4c, \dots, 9c$ ($h_1 = h_3 = c, h_2 = c, 2c, \dots, 7c$).

Результати скінченноелементного аналізу проведених обчислювальних експериментів показали, що використання ФГМ-включень в циліндричній оболонці з квадратним отвором призводить до ефекту значного зменшення величини ККН в околі отвору (на ~56%) і максимальних деформацій (на ~58%). При збільшенні величини модуля пружності ФГМ-включення має місце тенденція зменшення величини ККН і коефіцієнта концентрації деформацій.

Порівняльний аналіз одержаних результатів для випадку наявності в оболонці ФГМ-включення із відповідними результатами для оболонок за наявності однорідних включень показує, що застосування саме ФГМ-включень має значні переваги: спостерігається механічний ефект зменшення як інтенсивності напружень, так і інтенсивності деформацій в зоні концентрації параметрів напружено-деформованого стану. У разі застосування однорідних включень такого ефекту не відбувається.

Отже, за результатами проведеного комп'ютерного моделювання поведінки тонкостінних циліндричних оболонок з квадратним отвором і радіально-неоднорідним включенням встановлено вплив механічних властивостей ФГМ-включення, закону зміни величини його модуля пружності та ширини включення на ККН в оболонці. Знайдено раціональні параметри радіально-неоднорідного ФГМ-включення, надано рекомендації щодо практичного заснування одержаних результатів.

1. *Механика композитов*. Т. 7. Концентрация напряжений / Гузь А. Н., Космодамианский А. С., Шевченко В. П. (ред.). – К.: “А.С.К.”, 1998. – 387 с.
2. *Hudramovich V. S., Hart E. L., Terokhin B. I.* Stress concentration around a circular hole in thin plates and cylindrical shells with a radially inhomogeneous inclusion // *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials: Collected work.* – Springer, Cham. – 2024. – **204**. – Chapter 18. – P. 249–264.
3. *Yang Q., Cao H., Tang Y., Li Y., Chen X.* Experimental investigation of stress distributions in 3D printed graded plates with a circular hole // *Materials.* – 2021. – **14**, No. 24, 7845. – P. 1–13.

COMPUTER SIMULATION OF THE INFLUENCE OF AN ANNULAR INCLUSION FROM FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL ON THE STRESS CONCENTRATION FACTOR IN A CYLINDRICAL SHELL WITH A SQUARE HOLE

Based on the results of the computer simulation of the behavior of thin-walled cylindrical shells with a square hole and a radially inhomogeneous inclusion, the influence of the elastic modulus of the FGM inclusion and its width on the SCF in the shell was investigated. The rational parameters of a radially inhomogeneous FGM inclusion were established, which allows obtaining a mechanical effect: a decrease in the SCF by ~56% and the corresponding deformations by ~58%.