

ПРО СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ НАВОКОЛО КРУГОВОГО ОТВОРУ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ З КІЛЬКОМА ЕЛІПТИЧНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

Етері Гарт¹, Олександр Шебанов²

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

Тонкостінні елементи конструкцій (пластини та оболонки) широко використовуються в різних галузях техніки, включно з ракетобудуванням, авіацією, енергетикою, нафтогазовою промисловістю, будівництвом та ін. Через конструктивні або технологічні вимоги суцільність матеріалу конструкції може порушитись внаслідок утворення отворів і включень, що спричиняє неоднорідність структури. Це суттєво впливає на розподіл напружень і процеси деформування та руйнування системи. Важливим завданням механіки деформівного твердого тіла є дослідження впливу локальних концентраторів напружень на напружено-деформований стан (НДС) елементів тонкостінних конструкцій і знаходження способів зниження концентрації напружень. Для вивчення цих явищ широко використовують числові методи механіки, які, на відміну від аналітичних, є більш універсальними та ефективними для розв'язання такого класу проблем [3, 4].

У цій роботі досліджено НДС тонкостінної циліндричної оболонки з малим круговим отвором і розташованими навколо нього кількома еліптичними включеннями з іншого матеріалу. Розглянуто три конфігурації розміщення включень відносно отвору: 2 включення з вертикальним розташуванням, 2 включення із горизонтальним розташуванням, а також 4 включення, розташовані симетрично вздовж координатних осей. За допомогою методу скінченних елементів здійснено аналіз впливу відстані між отвором та включеннями, способом їх розташування, а також механічних властивостей включень на концентрацію параметрів НДС оболонки навколо отвору. Проведено порівняння одержаних результатів із відомими даними для оболонки без включень [2] та аналогічних задач для пластин [1].

Для зручності аналізу введено коефіцієнт відносної жорсткості включення $k = E_{\text{вкл}} / E_{\text{об}}$ ($E_{\text{вкл}}$ – модуль пружності включення, $E_{\text{об}}$ – модуль пружності оболонки). Включення вважалось «жорстким» при $k > 1$ та «м'яким» при $k < 1$. Розглянуто розташування двох та чотирьох включень для різних варіантів відстані l ($l = 8r; 5r; 3r; 2,5r$) між круговим отвором радіусу r та геометричним центром еліптичного включення у разі $k > 1$ та $k < 1$. Для кожної з досліджуваних конфігурацій визначено коефіцієнт концентрації напружень (ККН).

Для вертикального розташування двох включень числовий аналіз показав, що найбільш доцільним є використання «м'яких» включень. Це дає змогу зменшити ККН від ~4% до ~20% у порівнянні з оболонкою без включень [2].

Зокрема, при розташуванні включень на відстані $l=2,5r$ величина ККН зменшується на $\sim 20\%$, при $l=8r$ – на $\sim 4\%$. У разі двох вертикально розташованих «жорстких» включень величина ККН, навпаки, зростає від $\sim 2\%$ до $\sim 8\%$. Ці результати добре узгоджуються з результатами для аналогічної задачі для пластини [1].

Для горизонтального розташування двох включень аналіз показав, що найбільш доцільним є використання «жорстких» включень. Це дає змогу зменшити ККН від $\sim 1\%$ до $\sim 36\%$ у порівнянні з оболонкою без включень [2]. Зокрема, при розташуванні включень на відстані $l=2,5r$ величина ККН зменшується на $\sim 36\%$, при $l=8r$ – на $\sim 1\%$. У разі двох горизонтально розташованих «м'яких» включень величина ККН, навпаки, зростає від $\sim 1\%$ до $\sim 46\%$.

У випадку використання чотирьох включень, розташованих симетрично вздовж координатних осей, величину ККН вдається зменшити на $\sim 31\%$, використовуючи «жорсткі» включення та розташовуючи їх на відстані $l=2,5r$. У разі чотирьох «м'яких» включень найкращим варіантом є їх розташування на відстані $l=5r$, що дає змогу зменшити величину ККН на $\sim 5\%$.

Отже, за розглянутих варіантів параметрів і розташування еліптичних включень отримано, що конфігурація із найменшою відстанню $l=2,5r$ є найкращою з точки зору зниження концентрації напружень в оболонці в разі горизонтального розташування «жорстких» еліптичних включень (на $\sim 36\%$). Перспективним є пошук раціональних параметрів включень (їх форми, розмірів, кількості, механічних властивостей та розташування) щодо впливу на зменшення величини ККН.

1. Гарт Е. Л., Рибалко Я. В. Взаємовплив кругового отвору і оточуючих його еліптичних включень при пружному деформуванні прямокутної пластини // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2019. – Вип. 30. – С. 5–18.
2. Гузь А. Н., Чернышенко И. С., Чехов Вал. Н. и др. Методы расчета оболочек: в 5 т. Т. 1. Теория тонких оболочек, ослабленных отверстиями. – К.: Наук. думка, 1980. – 636 с.
3. Gudramovich V. S., Gart É. L., Strunin K. A. Modeling of the behavior of plane-deformable elastic media with elongated elliptic and rectangular inclusions // Materials Sc. – 2017. – 52, № 6. – P. 768–774.
4. Hart E. L., Hudramovich V. S. Projection-iterative schemes for the realization of the finite element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions // Journal of Mathematical Sciences. – 2014. – 203, No. 1. – P. 55–69.

ON METHODS OF REDUCING STRESS CONCENTRATION AROUND A CIRCULAR HOLE IN A CYLINDRICAL SHELL WITH SEVERAL ELLIPTICAL INCLUSIONS

Of the considered options for the arrangement of two elliptical inclusions around a circular hole in a cylindrical shell, the option of their horizontal arrangement using more “hard” inclusions ($k > 1$) turned out to be rational from the point of view of reducing stress concentration, which made it possible to reduce the value of the stress concentration coefficient by $\sim 36\%$. For “softer” inclusions ($k < 1$), their vertical location turned out to be the best option, and the value of the stress concentration factor can be reduced by $\sim 20\%$. Using of four elliptical “hard” inclusions allows to reduce the value of the stress concentration coefficient by $\sim 31\%$. These results are in good agreement for the corresponding plate.