

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КІЛЬЦЕВОГО ВКЛЮЧЕННЯ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО ВИДОВЖЕНОГО ЕЛІПТИЧНОГО ОТВОРУ У СФЕРИЧНІЙ ОБОЛОНЦІ

¹Інститут технічної механіки

Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: hudratovich@i.ua

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна; e-mail: hart@ua.fm

Оболонкові конструкції мають широке застосування в різноманітних галузях техніки та промисловості завдяки поєднанню великої міцності та відносно малої ваги. Найчастіше реальні конструкції з технологічних або конструктивних міркувань мають отвори, що призводить до різкого збільшення локальних напружень і, як наслідок, до зменшення міцності та надійності конструкції у цілому. Саме через це, питання зниження концентрації напружень в елементах тонкостінних конструкцій є важливою та актуальною проблемою механіки деформованого твердого тіла. В даній роботі проведено комп'ютерне моделювання та скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану тонкостінної сферичної оболонки за наявності видовженого еліптичного отвору і оточуючого його кільцевого еліптичного включення, що знаходиться на певній відстані від отвору. Досліджено вплив геометричних та механічних характеристик включення, а також відстані розташування включення від контуру отвору на концентрацію параметрів напружено-деформованого стану оболонки. Отримано розподіл інтенсивностей напружень і деформацій в зонах локальної концентрації напружень.

Встановлено, що за рахунок використання жорсткого кільцевого включення, розташованого на певній відстані від отвору оболонки, можна зменшити коефіцієнт концентрації напружень майже на 27 %. При цьому спостерігається пропорційне зменшення інтенсивності деформацій в околі отвору.

Ступінь видовженості еліптичного отвору суттєво впливає на концентрацію параметрів напружено-деформованого стану оболонки. У разі підкріплення отвору безпосередньо вздовж його контуру жорстким кільцевим включенням інтенсивність напружень навколо нього зростає, у той час як інтенсивність деформацій знижується. Проведені численні обчислювальні розрахунки показують, що використання віддалено розташованого від отвору оточуючого його жорсткого кільцевого включення дозволяє знизити інтенсивності як напружень, так і деформацій навколо отвору. У разі безпосереднього підкріплення отвору зниження максимальної інтенсивності деформацій дещо більше у порівнянні із випадком віддаленого розташування оточуючого отвір жорсткого кільцевого включення.

Використання певним чином підібраних і розташованих підкріплень видовжених еліптичних отворів у сферичних оболонках дозволяє впливати на розподіл і величину інтенсивностей напружень і деформацій в зонах локальної концентрації параметрів їх напружено-деформованого стану.

Ключові слова: сферична оболонка, видовжений еліптичний отвір, кільцеве еліптичне включення, напружено-деформований стан, концентрація напружень, скінченноелементний аналіз.

1. Погорелов В. И. Строительная механика тонкостенных конструкций. СПб., 2007. 528 с.
2. Абовский Н. П., Андреев Н. П., Деруга А. П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек. М., 1978. 228 с.
3. Авдонин А. С., Фигуровский В. Ф. Расчет на прочность летательных аппаратов. М., 1985. 39 с.
4. Арзамасов Б. Н., Соловьева Т. В., Герасимов С. А. Справочник по конструкционным материалам. М., 2005. 60 с.
5. Гарт Е. Л., Василевський К. О. Комп'ютерне моделювання поведінки пологої оболонки з круговими отворами при розтягу. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. Д., 2014. Вип. 22. С. 57–66.
6. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. М., 1977. 227 с.
7. Hart E. L., Terokhin B. I. Computer simulation of the stress-strain state of the plate with circular hole and functionally graded inclusion. Journal of Optimization, Differential Equations and their Applications. 2021. V. 29, Iss.1. P. 42–53. <https://doi.org/10.15421/142103>
8. Гарт Э. Л., Панченко С. В. Численный анализ напряжённо-деформированного состояния пластины с прямоугольным отверстием, подкреплённым треугольными накладками. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. Д., 2015. Вип. 2. С. 35–47.
9. Гудрамович В. С., Гарт Е. Л., Марченко О. А. Вплив форми підкріплень на напружено-деформований стан циліндричної оболонки з видовженими прямокутними отворами. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. Дніпро, 2017. Вип. 27. С. 52–64.
10. Гудрамович В. С., Гарт Е. Л., Панченко С. В. Напружено-деформований стан пластин з підкріпленнями прямокутними отворами різної орієнтації відносно напрямку дії зусилля розтягу. Техническая механика. 2018. № 4. С. 82–89. <https://doi.org/10.15407/itm2018.04.082>

11. 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 Science*. 2017. V. 52, Iss. 6. P. 768–774. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0020-z>
12. 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 Mater.* 2021. V. 52, No. 6. P. 832–842. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00237-7>
13. Тимошенко С. П., Лессельс Дж. Прикладная теория упругости. Л., 1931. 394 с.
14. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий. К., 1968. 888 с.
15. 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., 1980. 636 с.
16. Mulyar V. P. On the stress distribution in a spherical shell with an off-center curvilinear hole. *International Applied Mechanics*. 2006. V. 42, Iss. 1. P. 98–102. <https://doi.org/10.1007/s10778-006-0063-6>
17. Stepanyan M. N. The point moment at an arbitrary point of an elastic plane weakened by an elliptical hole. *J. Appl. Math. Mech.* 1999. V. 63, Iss. 2. P. 333–335. [https://doi.org/10.1016/S0021-8928\(99\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0021-8928(99)00044-1)
18. Довбня Е. Н., Крупко Н. А. Влияние кругового отверстия на напряженное состояние оболочки произвольной гауссовой кривизны. *Вісник Донец. ун-ту*. 2014. Вип. 1. С. 108–125. <https://doi.org/10.15593/2224-9893/2014.1.05>
19. Довбня К. М., Григорчук Ю. В. Напружений стан оболонки двоякої кривини з тріщиною при згинальному навантаженні. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. Дніпро*, 2012. Вип. 19. С. 112–116.
20. Guz A. N., Storozhuk E. A., Chernyshenko I. S., Inelastic deformation of flexible spherical shells with two circular openings. *Int. Appl. Mech.* 2004. V. 40, Iss. 6., P. 672–678. <https://doi.org/10.1023/B:INAM.0000041395.63200.aa>
21. Storozhuk E. A., Chernyshenko I. S. Physically and geometrically nonlinear deformation of spherical shells with an elliptic hole. *Int. Appl. Mech.* 2005. V. 41, Iss. 6. P. 666–674. <https://doi.org/10.1007/s10778-005-0134-0>
22. Марченко О. А., Гарт Е. Л., Гудрамович, В. С. Концентрація напружень навколо еліптичного отвору у сферичній оболонці за наявності кільцевого включення. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. Дніпро*, 2021. Вип. 33. С. 98–113.
23. 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 Mater.* 2021. V. 52, No. 6. P. 832–842. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00237-7>
24. Евзеров И. Д., Здоренко В. С. Сходимость плоских конечных элементов тонкой оболочки. *Строит. механика и расчет сооружений*. 1984. №1. С. 35–40.

Отримано 29.06.2022,
в остаточному варіанті 05.09.2022