

МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕРМОПРУЖНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВИХ СФЕРИЧНИХ ПОСУДИН

Юрій Кульчицький-Жигайло

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН
України, kulchytskiyyura@gmail.com

Запропоновано аналітичний підхід до дослідження нестационарного термопружного стану багатошарових порожнистих сфер за одночасного впливу внутрішнього тиску та змінного у часі теплового навантаження. Актуальність дослідження зумовлена широким використанням таких конструкційних елементів у важливих інженерних комплексах та спорудах (наприклад, - реакторах та резервуарах хімічної та енергетичної галузей). Для забезпечення безперебійної та тривалої експлуатації таких систем критично важливим є моніторинг та контроль термічних напружень як важливого руйнівного фактору.

Запропонована математична модель ґрунтується на квазістатичному наближенні. Температурне поле в неоднорідній стінці посудини визначається шляхом розв'язання нестационарної задачі теплопровідності на основі закону Фур'є. Для цього застосовано абсолютно стійку неявну скінченно-різницеву схему Кранка–Ніколсона. Дана схема має другий порядок точності за часом та радіальною координатою.

Для розрахунку механічних характеристик використано модифікований метод безпосереднього інтегрування [1]. Він дає змогу отримати розподіли радіальних переміщень та напружень у градієнтних трансверсально-ізотропних сферах. Властивості таких сфер описуються довільними (зокрема кусково-неперервними) функціями радіальної координати. Розрахунок виконано для температурного поля, отриманого в результаті незалежного розв'язання задачі теплопровідності.

Числовий аналіз здійснено для прикладу тришарової сферичної посудини, складеної із внутрішнього керамічного теплоізоляційного шару, проміжного градієнтного шару у вигляді метало-керамічного ламінату та зовнішнього металевого «несучого» шару. Градієнтний проміжний шар забезпечує плавний перехід від властивостей кераміки до властивостей металу. Особливістю моделі є опис проміжного композитного шару за допомогою процедури гомогенізації з мікролокальними параметрами [2]. Це

Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2026», 27–29 травня 2026 р., Львів

забезпечує адекватне визначення не лише усереднених показників, а й напружень у кожному конкретному компоненті репрезентативної комірки ламінату.

Результати досліджень продемонстрували, що термічні навантаження суттєво перерозподіляють напруження в стінці. На внутрішній поверхні виникають значні стискальні зусилля. Водночас на зовнішній поверхні з'являються розтягувальні напруження, які можуть на порядок перевищувати напруження від механічного тиску. Впровадження теплоізоляційного покриття суттєво зменшує енергетичні витрати, необхідні для підтримки робочої температури. Крім того, воно захищає метал від надмірних температур та знижує напруження розтягу в несучому шарі. Проміжний шар, у свою чергу, дає змогу зменшити рівень розтягувальних напружень у захисному керамічному покритті, що є критичним для збереження цілісності конструкції.

Розроблений аналітичний інструментарій дає змогу проводити ефективний підбір товщини та властивостей шарів для оптимізації міцності конструкції та забезпечення її експлуатаційної надійності при екстремальних термомеханічних режимах.

Перспективою подальших досліджень є врахування конвективного теплообміну із зовнішнім середовищем. Також планується використання альтернативних керамічних фаз (зокрема діоксиду цирконію) та врахування залежності фізико-механічних властивостей матеріалів від температури.

1. Tokovyy Y. "Elastic and thermoelastic response of multilayer inhomogeneous hollow cylinders," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 31, no. 17, pp. 3889–3901, 2024.
2. Matysiak S. J. and Woźniak C. Z. "Micromorphic effects in a modeling of periodic multilayered elastic composites," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 25, no. 5, pp. 549–559, 1987.

ANALYSIS OF TRANSIENT THERMOELASTIC RESPONSE OF MULTILAYER SPHERICAL PRESSURE VESSELS

This study presents an analytical investigation into the transient thermoelastic behavior of multilayered spherical vessels under combined mechanical and thermal loads. The proposed approach utilizes a finite-difference scheme for heat conduction analysis and a modified direct integration method for stress evaluation. The model incorporates a functionally graded intermediate layer through a homogenization procedure. Results indicate that thermal insulation significantly reduces tensile stress levels in the load-bearing core, while graded transitions mitigate interfacial discontinuities. This framework provides an efficient tool for optimizing vessel durability under transient operating conditions.