

УДК 539.3+514.18

Олена БОЙЧУК

BoychukLena@rambler.ru

Максим БОРИСЕНКО

maxborisenko530@mail.ru

Олександр ПРИГОДА

valex22@ukr.net

ORCID: 0000-0001-8257-5892

м. Миколаїв

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТРУКТУРОВАНОЇ ОБОЛОНКИ

У роботі досліджуються структуровані оболонки на міцність та жорсткість. Моделювання геометрії та чисельний розрахунок напружено-деформованого стану виконано методом скінченних елементів, реалізованим в комп'ютерній програмі FEMAP з розв'язувачем NASTRAN. Проводиться порівняння за міцністю та жорсткістю двошарової структурованої оболонки та двох одношарових з різним ступенем розрідження, еквівалентними за розмірами та масою.

Ключові слова: структурована оболонка, метод скінченних елементів, FEMAP, напружено-деформований стан.

При проектуванні конструкцій найголовніші питання, які повинні бути вирішені, це – міцність, надійність та економія матеріалу, легкість та простота монтажу. Конструктивним рішенням із задоволенням зазначених вимог є структурована конструкція, що представляє перехресно-стержневу систему. Структуровані конструкції найменш вразливі до руйнування при виході з ладу частини несучої конструкції, що забезпечує міцність конструкції в цілому.

Задачі із складною геометрією вирішуються чисельними методами, до яких також відноситься метод скінченних елементів. Для геометричного моделювання та чисельного розрахунку в роботі застосовувалась програма FEMAP з програмою скінченно-елементного аналізу NASTRAN.

В NASTRAN реалізовано варіант методу скінченних елементів, в якому шуканим є вектор переміщень [1]. У матричному позначенні це вектор

$$\{U\} = \{U_1; U_2; U_3\}^T, \quad (1)$$

який виражається через вектор переміщень у вузлах скінченного елемента $\{q\}_e$ та матрицю базисних функцій скінченного елемента $[\Phi]$:

$$\{U\} = [\Phi]\{q\}_e. \quad (2)$$

Для будь-якої точки в межах скінченного елемента вектор деформацій $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31}\}^T$ визначається вузловими переміщеннями:

$$\{\varepsilon\} = [\mathbf{B}]\{q\}_e, \quad (3)$$

де $[\mathbf{B}]$ – блочна матриця диференціювання по глобальним координатам, а напруження $\{\sigma\} = \{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}\}^T$ визначаються за законом Гука

$$\{\sigma\} = [\mathbf{D}]\{\varepsilon\}_e, \quad (4)$$

де $[\mathbf{D}]$ – матриця модулів пружності матеріалів.

Вектор вузлових переміщень всієї конструкції визначається з рівняння жорсткості

$$[\mathbf{K}]\{q\} = \{P\}, \quad (5)$$

де $[K] = \sum_e [K]_e$, $\{P\} = \sum_e \{P\}_e$, $[K]_e = \int_{\Omega'} [B]^T [D] [B] d\Omega$ – матриця жорсткості елемента, $\{P\}_e$ – вектор узагальнених сил, що діють на елемент.

Для дослідження була обрана двошарова сітчаста сферична оболонка з розкосами (рис. 1, а), де відношення діаметра основи до висоти рівне 4:1, відношення діаметра нижньої основи до діаметра верхнього отвору теж становить 4:1. Кількість з'єднань на нижньому колі рівна 36, кількість з'єднань вздовж меридіанів становить 8. Для моделювання покриття обиралися такі параметри: діаметр – 100 м, висота – 25 м.

Для порівняння міцності, жорсткості та стійкості створювалася також дві одношарові сферичні оболонки таких же діаметрів основ та висоти. Одношарові оболонки відрізняються ступенем згущення прямих. В оболонці розрідженої структури (рис. 1, б) сітка прямих за згущенням ідентична сітці прямих одного шару двошарової оболонки. Сітка прямих одношарової оболонки згущеної структури (рис. 1, в) ідентична сіткам зразу двох шарів, точки яких не зміщувалися з сферичної поверхні радіусом 62,5 м.

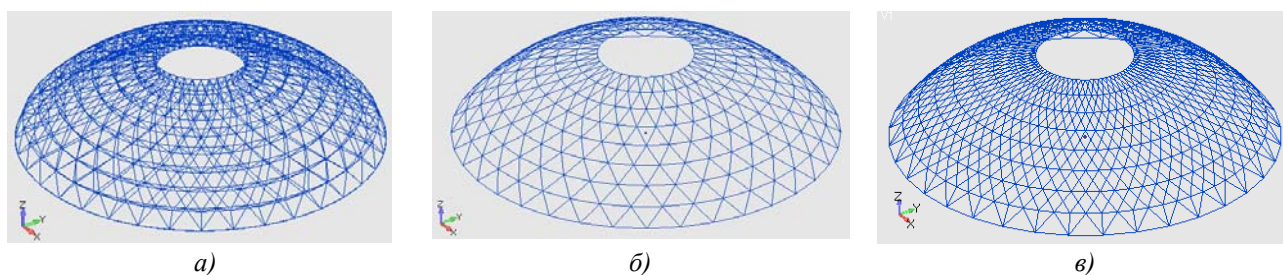


Рис. 1. Геометрія структурованої оболонки

В якості матеріалу задавався алюміній з характеристиками: модуль Юнга $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,34$, густина $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$. Для розбивки двошарової структурованої оболонки були задані трубчасті лінійні скінченні елементи типу BEAM з поперечними перерізами радіусом 200 мм, товщиною 10 мм. Для забезпечення еквівалентності по масі для одношарових оболонки згущеної та розрідженої структури задавалися поперечні перерізи відповідно товщиною 15 мм та 25 мм.

Розміри скінченних елементів обиралися згідно принципу практичної збіжності результату. Сітка розбивки для структурних оболонок остаточно задавалася так, щоб ділянки арматури від з'єднання до з'єднання моделювалися п'ятьма елементами. Кількість вузлів та елементів оболонок становлять: 11520 елементів та 9828 вузлів для двошарової з розкосами; 13680 елементів та 12060 вузлів для одношарової згущеної структури, 4500 елементів та 3924 вузла для одношарової розрідженої структури.

Закріплення та навантаження прикладалися до вузлів розбивки. Закріплення проводилось по нижнім вузлам, що відповідає закріпленню в реальності. Навантаження відповідає тиску 5 кПа, що задає вага покрівлі, снігу, також враховувалась власна вага металевого каркасу.

Проводився статичний розрахунок напружено-деформованого стану сформованих скінченно-елементних моделей оболонок з урахуванням заданих граничних умов. Результати представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків

Тип структурованої оболонки	Найбільші переміщення, мм	Найбільші напруження розтягу, МПа	Найбільші напруження стиску, МПа
Двошарова з розкосами	61,2	52	-75
Одношарова згущеної структури	77,2	35	-93
Одношарова розрідженої структури	62,3	41	-53

Розподіли переміщень та напружень представлені відповідно для структурованої двошарової структурованої оболонки з розкосами (рис. 2), одношарової згущеної структури (рис. 3), одношарової розрідженої структури (рис. 4).

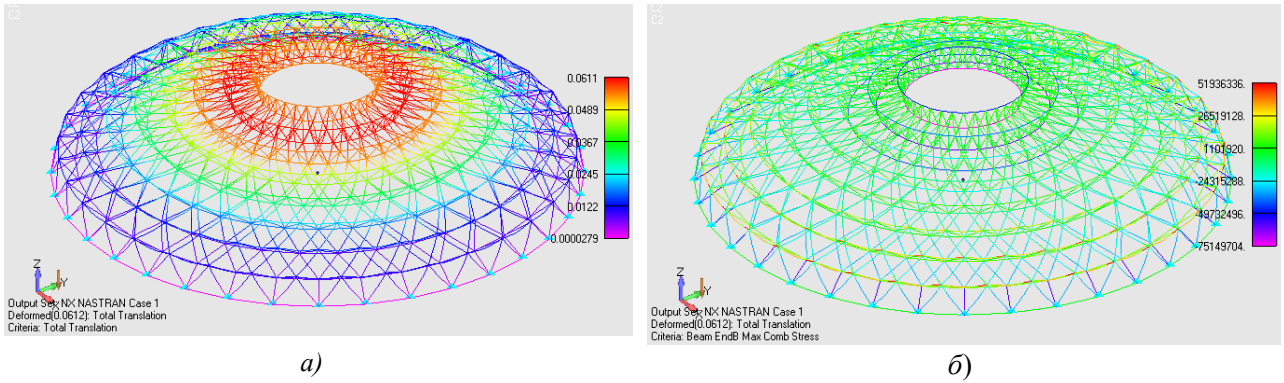


Рис. 2. Розподіли переміщень (а) та напружень (б) для структурованої двошарової оболонки з розкосами

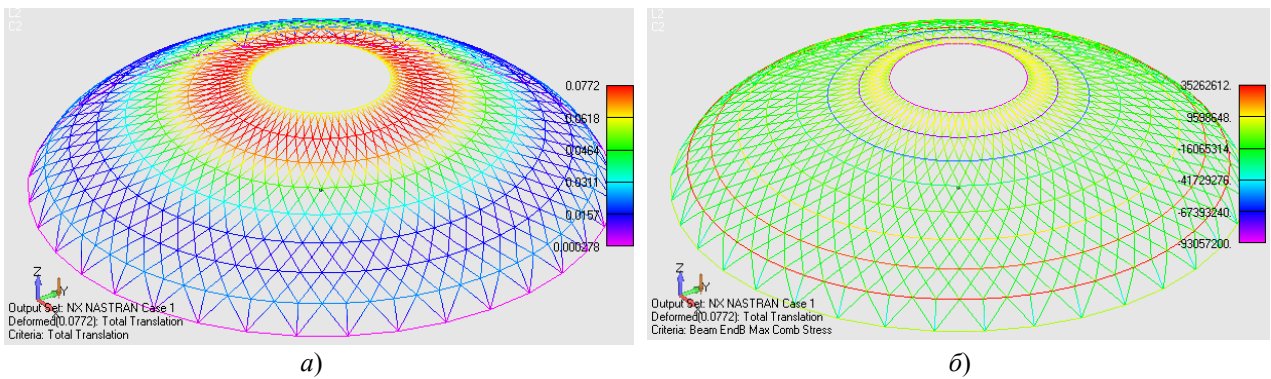


Рис. 3. Розподіли переміщень (а) та напружень (б) для структурованої одношарової оболонки згущеної структури

Розподіли переміщень показують, що переміщення змінюється з висотою від нуля до максимального значення для верхніх вузлів. Розподіли напружень свідчить, що найбільший стиск зазнають найнижчі опорні стержні внутрішнього шару та верхні горизонтальні, а найбільший розтяг – нижні горизонтальні стержні. Значення напружень не перевищують межі міцності алюмінію. Для одношарової оболонки згущеної структури максимальні переміщення більші на 26 %, а максимальні напруження стиску більші на 21 %, ніж відповідні переміщення та напруження двошарової оболонки з розкосами, що свідчить про перевагу останньої по міцності та жорсткості.

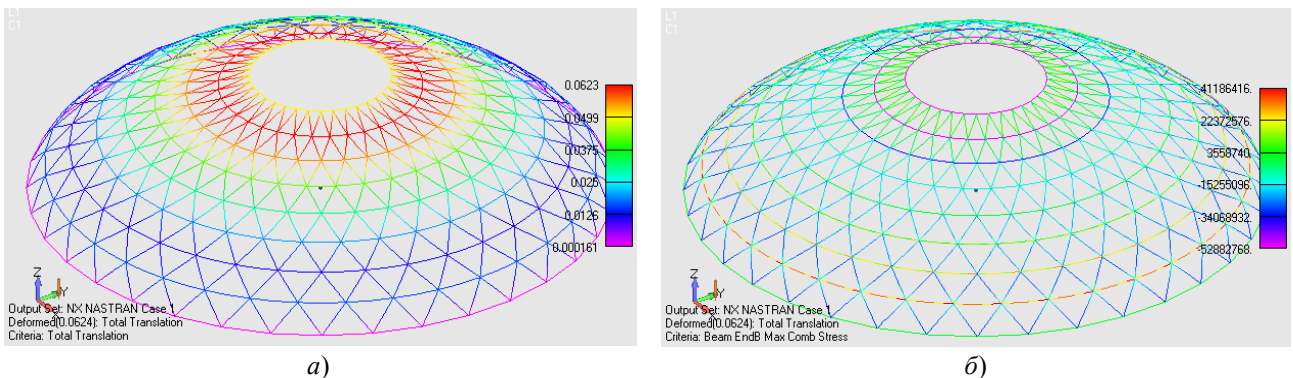


Рис. 4. Розподіли переміщень (а) та напружень (б) для структурованої одношарової оболонки розрідженої структури

Перевага двошарової оболонки з розкосами над одношаровою оболонкою розрідженої структури не так очевидна. Для забезпечення еквівалентності по масі площа перерізів стержнів останньої була

збільшена в 2,4 разу порівняно з площею перерізу стержнів двошарової, отже стержні одношарової оболонки розрідженої структури можуть прийняти навантаження більші в 2,4 разу. При цьому при однакових навантаженнях максимальні за модулем напруження для одношарової оболонки розрідженої структури менші лише в 1,4 разу. Жорсткість відрізняється лише на 2 % на користь двошарової структурованої оболонки з розкосами. Структурована двошарова оболонка менш металоемна.

Навантаження, що прикладалось, і характеристики матеріалу застосовувались з метою проведення оціночних розрахунків. Розроблена модель може бути застосована для підбору розмірів перерізів стержнів у відповідності із відомим реальним навантаженням, для підбору різних матеріалів у нижніх і верхніх шарах відповідно до зміни зусиль в елементах.

Список використаних джерел

1. Рудаков К. Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. — К. : НТУУ КПИ, 2011. — 317 с.
2. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. — М. : ДМК Пресс, 2003. — 447 с.

Olena BOYCHUK, Maxim BORISENKO, Oleksandr PRIGODA

Mykolaiv

NUMERICAL SIMULATION AND CALCULATION OF STRUCTURED SHELL STRESS-STRAIN STATE

In this paper the structured shells are researched for strength and rigidity. Modeling geometry and numerical calculation of stress-strain state were made by finite element method implemented in FEMAP software with NASTRAN solver. An equivalent sizes and weight structured bilayer shell and two one-layer with different degrees of rarefaction strength and rigidity comparison is carried out.

Keywords: structured shell, finite element method, FEMAP, stress-strain state.

Елена БОЙЧУК, Максим БОРИСЕНКО, Александр ПРИГОДА

г. Николаев

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ОБОЛОЧКИ

В работе исследуются структурированные оболочки на прочность и жесткость. Моделирование геометрии и численный расчет напряженно-деформированного состояния выполнено методом конечных элементов, реализованным в компьютерной программе FEMAP с решателем NASTRAN. Проводится сравнение по прочности и жесткости двухслойной структурированной оболочки и двух однослойных с разной степенью разрежения, эквивалентными по размерам и массе.

Ключевые слова: структурированная оболочка, метод конечных элементов, FEMAP, напряженно-деформированное состояние.

Стаття надійшла до редколегії 31.03.2017