

УДК 539.3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕСУЧИХ ШАРІВ І ПОЛІМЕРНОГО ЗАПОВНЮВАЧА НА КОЛИВАЛЬНИЙ ПРОЦЕС ШАРУВАТОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

**В.В. Гайдайчук,**

д-р техн. наук

**К.Е. Котенко,**

канд. техн. наук

**М.О. Клименко,**

канд. техн. наук

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ  
03037, м. Київ, Україна, проспект Повітряних Сил, 31*

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.161-170

Досліджені динамічні перехідні процеси та наведені результати оцінки впливу геометричних і фізико-механічних параметрів несучих шарів і полімерного заповнювача на поведінку тришарової циліндричної оболонкової структури при нестационарному імпульсному навантаженні.

Використана модель теорії оболонок і стержнів С.П. Тимошенка враховуюча незалежні статичні і кінематичні гіпотези до кожного шару структури.

Виконані чисельні розрахунки нормальних прогинів  $u_3$  і нормальних напружень  $\sigma_{22}$  несучих шарів структури, визначаючих її напружено-деформований стан (НДС).

Розглянуто варіанти структури з дискретно-симетричним армованим ребрами заповнювачем різної пружності. Приведено порівняльний аналіз прогинів і напружень несучих шарів структури при параметрах легкого заповнювача:  $E_1/E_t = 500$  і  $E_1/E_t = 50$ .

**Ключові слова:** тришарова циліндрична оболонка, скінченно-елементна модель, полімерний заповнювач, нестационарне навантаження, несучий шар.

### Вступ

Шаруваті оболонкові структури різної конструкції широко використовують в машинобудуванні, авіа-, ракето-, суднобудуванні, атомній енергетиці, будівництві і інших галузях техніки. Конструкції цього типу відзначаються різними формами, особливою шаруватого пакету, геометричними розмірами і фізико-механічними властивостями їх матеріалів. Такий стан проблеми став результатом робіт багатьох дослідників і конструкторів. Значний прорив в цій галузі був досягнутий завдяки успішному моделюванню коливальних процесів таких структур і використанню сучасних розрахункових методів [1-4]. Але, як свідчить практика, окремі проблеми ще залишилися не вирішеними. Вдосконалення потребують як самі розрахункові моделі, так і особливості їх розрахунків [6-9]. В цій ситуації доцільним представляється накопичення досвіду чисельних розрахунків з врахуванням конструкційних особливостей шаруватих оболонкових структур [8-12].

### Постановка задачі

Ілюстрацією може бути постановка і розв'язання задачі динамічного деформування циліндричної шаруватої оболонки. Одним із її варіантів може бути визначення НДС тришарової оболонки, яка представляє собою пружну структуру, що складається (рис. 1) з внутрішнього (1) і зовнішнього (3) несучих шарів, полімерного заповнювача (2), армованого дискретними ребрами (4), і знаходиться під дією внутрішнього імпульсного осесиметричного навантаження

$$P_3 = A \cdot \sin \frac{\pi t}{T} [\eta(t) - \eta(t-T)], \quad (1)$$

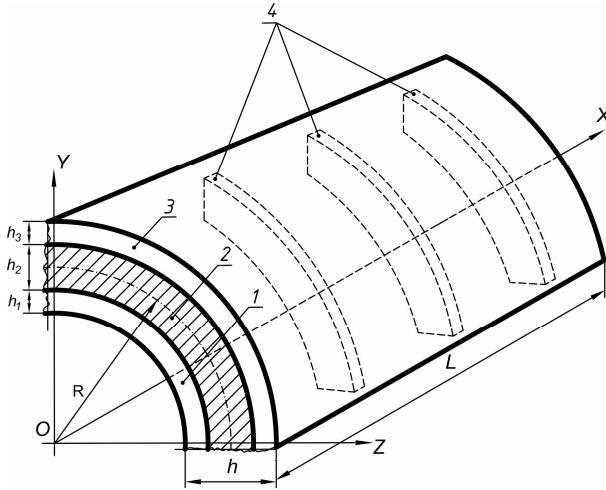


Рис. 1. Конструкція тришарової оболонки: 1 – внутрішній шар; 2 – заповнювач; 3 – зовнішній шар; 4 – армуючі ребра

де  $A$  – амплітуда навантаження;  $T$  – тривалість імпульсу навантаження;  $\eta(t)$  – функція Хевісайда. В розрахунках приймалося  $A = 10^6$  Па;  $T = 50 \cdot 10^{-6}$  Па.

У випадку несиметричної тришарової циліндричної оболонки з дискретним армуванням заповнювачем по лініях кривизни оболонки, рівняння коливань мають вид

$$\frac{\partial T_{11}^1}{\partial x} + \frac{T_{13}^1}{R_{i1}} - \frac{4}{h_1^2} M_{13}^1 = \rho_1 h_1 \frac{\partial^2 u_1^i}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial M_{11}^1}{\partial x} - \frac{T_{13}^1}{R_{i1}} + \frac{2h}{h_1^2} M_{13}^1 = \rho_1 \frac{h_1^3}{12} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2}; i = 1, 2,$$

$$\frac{\partial T_{13}^i}{\partial x} - \frac{T_{11}^i}{R_{i1}} - \frac{1}{R_{i1} h_i} M_{11}^i + \frac{1}{h_i} \frac{\partial M_{13}^i}{\partial x} - (1 \pm \frac{h_1}{2R_{i1}}) P_i = \rho_i h_i \frac{\partial^2 u_{30}^i}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial T_{11}^i}{\partial x} + \frac{1}{R_{i1}} (T_{11}^i - T_{13}^i) + \frac{8}{h_i^2} M_{13}^i = \rho_i h_i \frac{\partial^2 u_{10}^i}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial M_{11}^i}{\partial x} - T_{13}^i + \frac{1}{R_{i1}} M_{13}^i = \rho_i h_i \frac{\partial^2 u_{11}^i}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial T_{11}^2}{\partial x} - \frac{T_{13}^2}{R_{i2}} = (\rho_2 h_2 + \frac{\rho_1 h_1}{3}) \frac{\partial^2 u_1^2}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial T_{13}^2}{\partial x} - \frac{1}{R_{i2}} T_{11}^2 = \rho_2 h_2 \frac{\partial^2 u_{03}^2}{\partial t^2},$$

$$[T_{11}]_j = \rho_j F_j \frac{\partial^2 u_{1j}}{\partial t^2}, [T_{13}]_j = \rho_j F_j \frac{\partial^2 u_{3j}}{\partial t^2}, [M_{11}]_j = \rho_j I_{krj} \frac{\partial^2 \varphi_{1j}}{\partial t^2}. \quad (2)$$

При жорсткому защемленні країв оболонки граничні умови при  $x = 0$ ;  $x = L$  ( $L$  - довжина оболонки) поклалися:

$$u_1^i(0, t) = u_3^i(0, t) = 0, \quad i = 1, 2,$$

$$u_1^i(L, t) = u_3^i(L, t) = 0, \quad i = 1, 2,$$

Початкові умови приймалися нульовими:

$$u_1^i(x, 0) = \frac{\partial u_1^i(x, 0)}{\partial t} = 0, \quad i = 1, 2,$$

$$u_3^i(x, 0) = \frac{\partial u_3^i(x, 0)}{\partial t} = 0, \quad i = 1, 2,$$

**Результати розрахунку.** Враховуючи неоднаковість властивостей матеріалів суміжних шарів досліджуваної неоднорідної оболонкової структури задачі її динамічного аналізу розв'язувалися скінченно-елементним методом. Для виконання розрахунків була створена скінченно-елементна модель структури, приведена на рис. 2.

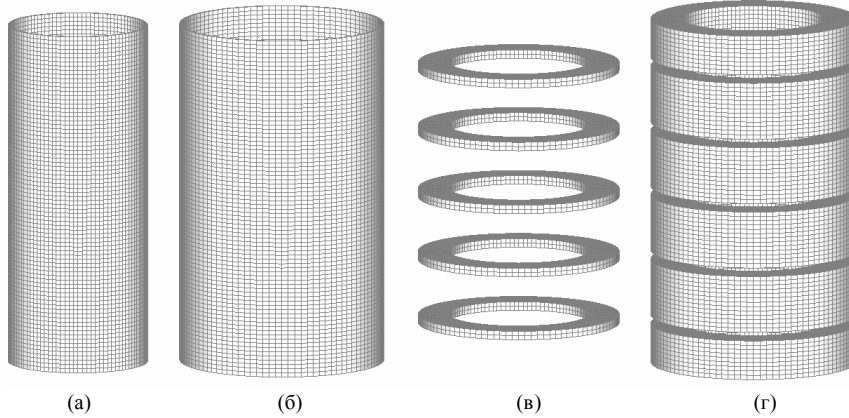


Рис. 2. Скінченно-елементна модель структури: (а) внутрішня несуча оболонка; (б) зовнішня несуча оболонка; (в) армуючі ребра; (г) легкий заповнювач

Скінченно-елементна модель створювалася з використанням тривимірного об'ємного скінченного елемента типу *Solid*, який по критеріям якості: звуженню і викривленню, внутрішнім кутам та інших показниках, відповідав вимогам забезпечення розрахункової сітки на скінченно-елементному рівні [5]. Модель тришарової циліндричної структури налічувала у внутрішній несучій оболонці 16000 елементів, у зовнішній – 16000, а в армуючих ребрах – 18000. Кількість скінченних елементів легкого заповнювача дорівнювала 126000. Загальна кількість скінченних елементів у моделі складала 176000 елементів і 186300 вузлів.

Підкріплюючі ребра в моделі розташовувалися в наступних точках

$$x_j = [10 + (k-1) \cdot 15] \cdot \Delta x; k=1 \div 5; \Delta x = L/80.$$

Розглянемо три випадки динамічної поведінки тришарової циліндричної оболонки при нестационарному навантаженні в часовому інтервалі  $0 \leq t \leq 40T$ . Кожен з цих випадків включає два варіанти чисельних розрахунків показників напружено-деформованого стану при різних фізико-механічних параметрах легкого заповнювача: перший  $E_1/E_t = 500$  і другий  $E_1/E_t = 50$ .

У першому випадку структура задавалась з наступними геометричними і фізико-механічними параметрами:  $h_1 = h_2 = 0,002$  м;  $L/h_1 = 200$ ;  $R = 0,18$  м;  $R/h = 4,5$ ;  $H_j/h_1 = 18$ ;  $F_j = 3,6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>; модулі пружності несучих шарів і армуючих ребер  $E_1^1 = E_1^2 = E_j = 7 \cdot 10^{10}$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu_1^1 = \nu_1^2 = \nu_j = 0,33$ ;  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_j = 2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Параметри для легкого заповнювача були наступні: модуль пружності  $E_t = 1,4 \cdot 10^8$  Па і  $E_t = 1,4 \cdot 10^9$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu_t = 0,3$ ; щільність  $\rho_t = 25$  кг/м<sup>3</sup>. Таким чином досліджувалась циліндрична симетрична тришарова оболонка з легким заповнювачем, навантажена внутрішнім імпульсним тиском  $P_3$ .

Позначення індексів були наступними: 1 - внутрішній несучий шар, t - легкий заповнювач, j - армуючі ребра, 2 - зовнішній несучий шар.

Розрахунки максимальних величин нормальних прогинів  $u_3$  і нормальних напружень  $\sigma_{22}$  в серединній поверхні несучих шарів оболонки були проведені у програмно-розрахунковому комплексі *Nastran* алгоритмом прямого перехідного динамічного процесу. Отримані результати представлені на рис. 3 - рис. 8.

На рис. 3а у наведеному масштабі показані порівняльні графіки максимальних прогинів коливальних процесів у серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 5,1T$  (у цей момент величини досягають максимального значення в розрахунковому інтервалі часу  $t$ ). Крива з індексом 1 відповідає прогину  $u_3^1$  внутрішнього шару, а з індексом 2 -  $u_3^2$  зовнішнього шару. Дискретність розміщення армуючих ребер

візуально спостерігається на рисунку - це ділянки максимального зближення кривих з індексами 1 і 2. Перші п'ять власних частот цієї тришарової структури становлять:  $f_1=1832,019$  Гц,  $f_2=1832,019$  Гц,  $f_3=2565,975$  Гц,  $f_4=2565,979$  Гц,  $f_5=2769,585$  Гц.

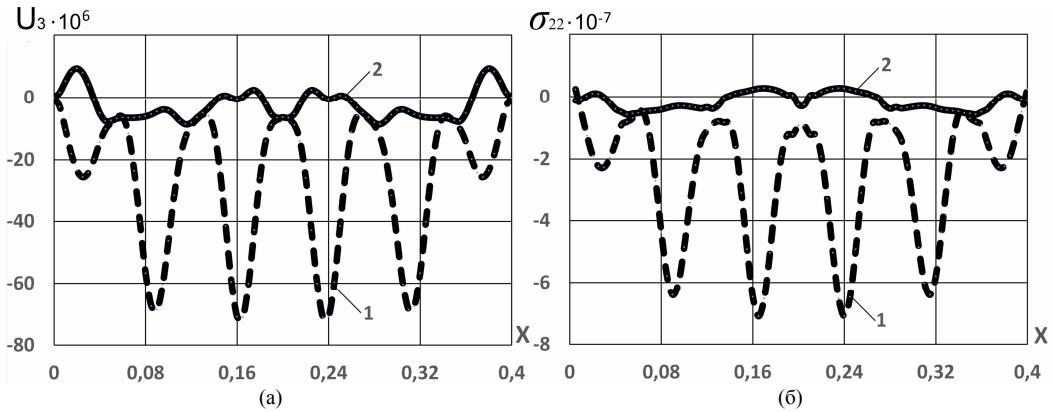


Рис. 3. Максимальні прогини  $u_3^1, u_3^2$  і напруження  $\sigma_{22}^1, \sigma_{22}^2$  в серединній поверхні несучих шарів при  $E_{1,2}/E_t = 500$

На рис. 3б наведені порівняльні графіки максимальних напружень  $\sigma_{22}^1(I), \sigma_{22}^2(2)$  в серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 5,1T$  (у цей момент величини досягають максимального значення в розрахунковому інтервалі часу  $t$ ).

На рис. 4а наведено порівняльні графіки максимальних прогинів коливальних процесів у серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 10,15T$ . На рис. 4б наведені порівняльні графіки максимальних напружень  $\sigma_{22}^1(I), \sigma_{22}^2(2)$  в цей же момент часу. Перші п'ять власних частот даної тришарової структури становлять:  $f_1=2047,017$  Гц,  $f_2=2047,017$  Гц,  $f_3=2484,977$  Гц,  $f_4=2484,979$  Гц,  $f_5=3007,011$  Гц.

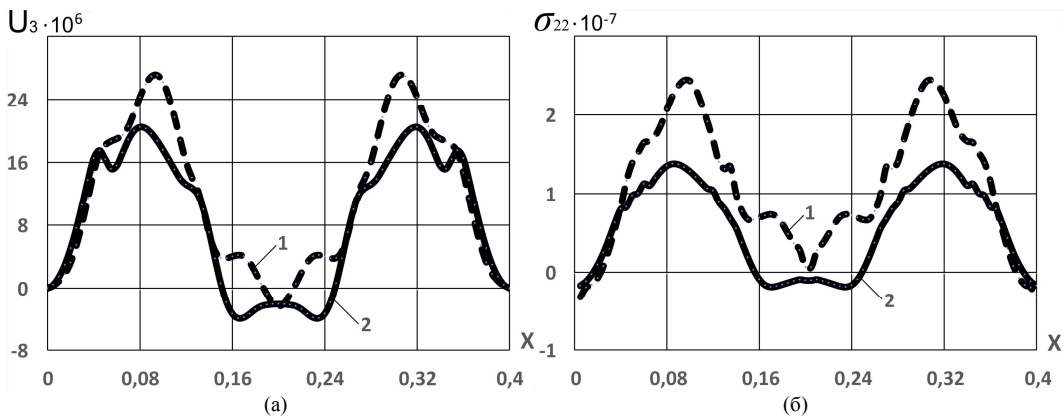


Рис. 4. Максимальні прогини  $u_3^1, u_3^2$  і напруження  $\sigma_{22}^1, \sigma_{22}^2$  в серединній поверхні несучих шарів при  $E_{1,2}/E_t = 50$

З аналізу чисельних результатів характеристик напружено-деформованого стану в серединних поверхнях оболонкової структури однорідної симетричної конструкції в першому випадку (рис. 3а, 4а) максимальні прогини внутрішнього шару  $u_3^1$  у варіанті співвідношення  $E_1/E_t = 500$  перевищили аналогічні прогини  $u_3^1$  структури при співвідношенні  $E_1/E_t = 50$  майже в 2,62 рази, а максимальні прогини  $u_3^2$  зовнішнього шару при відповідних варіантах – були меншими в 2,19 рази.

В той же час (рис. 3б, 4б) і максимальні величини нормального напруження внутрішнього шару  $\sigma_{22}^1$  у варіанті співвідношення  $E_1/E_t = 500$  перевищили аналогічні напруження  $\sigma_{22}^1$  структури при співвідношенні  $E_1/E_t = 50$  майже в 2,7 рази, а максимальні напруження  $\sigma_{22}^2$  зовнішнього шару при розгляді відповідних варіантів цього випадку були меншими приблизно в 2,5 рази.

У другому випадку при незмінній геометрії, структура оболонки мала наступні фізико-механічні параметри:  $h_1 = h_2 = 0,002$  м;  $L/h_1 = 200$ ;  $R = 0,18$  м;  $R/h = 4,5$ ;  $H_j/h_1 = 18$ ;  $F_j = 3,6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>; модулі пружності несучих шарів і армуючих ребер  $E_1^1 = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па;  $E_1^2 = E_j = 7 \cdot 10^{10}$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu_1^1 = \nu_1^2 = \nu_j = 0,3$ ;  $\rho_1 = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2 = \rho_j = 2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Параметри для легкого заповнювача були наступні: модуль пружності  $E_t = 1,4 \cdot 10^8$  Па і  $E_t = 1,4 \cdot 10^9$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu_t = 0,33$ ; щільність  $\rho_t = 25$  кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 5а зображені порівняльні графіки максимальних прогинів коливальних процесів у серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент досягнення максимального значення в розрахунковому інтервалі часу при  $t = 10,85T$ . В цьому варіанті співвідношення модулів пружності складає  $E_2/E_t = 500$ . Крива з індексом 1 відповідає прогину  $u_3^1$  внутрішнього шару, а з індексом 2 -  $u_3^2$  зовнішнього шару. Перші п'ять власних частот даної тришарової структури становлять:  $f_1=2047,017$  Гц,  $f_2=2047,017$  Гц,  $f_3=2484,977$  Гц,  $f_4=2484,979$  Гц,  $f_5=3007,011$  Гц.

На рис. 5б наведені порівняльні графіки максимальних напружень  $\sigma_{22}^1(1)$ ,  $\sigma_{22}^2(2)$  в серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 10,85T$ .

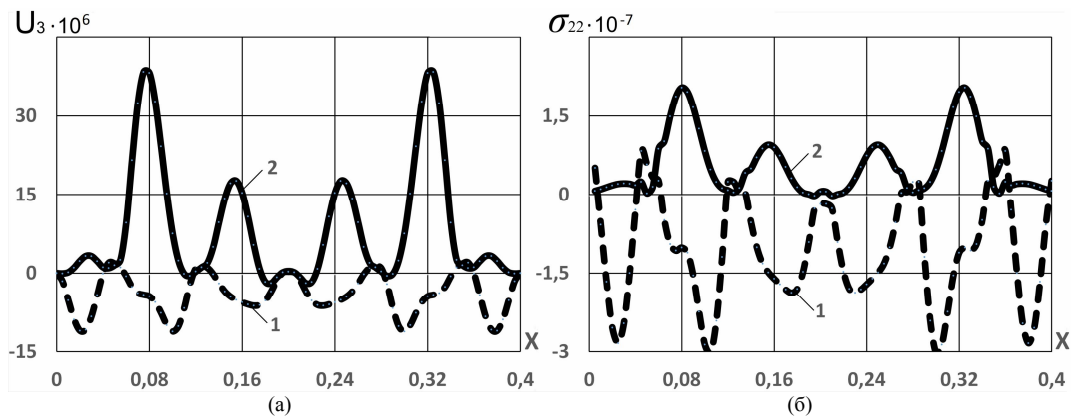


Рис. 5. Максимальні прогини  $u_3^1$ ,  $u_3^2$  і напруження  $\sigma_{22}^1$ ,  $\sigma_{22}^2$  в серединній поверхні несучих шарів при  $E_2/E_t = 500$

На рис. 6а наведені графіки максимальних прогинів коливальних процесів у серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 10,7T$ . В цьому варіанті співвідношення модулів пружності складає  $E_2/E_t = 50$ . Перші п'ять власних частот даної тришарової структури становлять:  $f_1=2241,238$  Гц,  $f_2=2241,238$  Гц,  $f_3=2997,924$  Гц,  $f_4=2997,926$  Гц,  $f_5=3167,348$  Гц.

На рис. 6б наведені графіки максимальних напружень  $\sigma_{22}^1(1)$ ,  $\sigma_{22}^2(2)$  в серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 10,7T$ .

Аналізуючи отримані чисельні результати показників напружено-деформованого стану в серединних поверхнях несиметричної структури другого випадку (рис. 5а, 6а) видно, що максимальні прогини внутрішнього шару  $u_3^1$  у варіанті співвідношення  $E_2/E_t = 500$  були меншими аналогічних прогинів  $u_3^1$  структури при співвідношенні  $E_2/E_t = 50$  майже на 59%, а

максимальні прогини  $u_3^2$  зовнішнього шару, при розгляді відповідних варіантів цього випадку, перевищили майже в 2,5 рази аналогічні прогини  $u_3^1$  структури при співвідношенні  $E_2/E_t = 50$ .

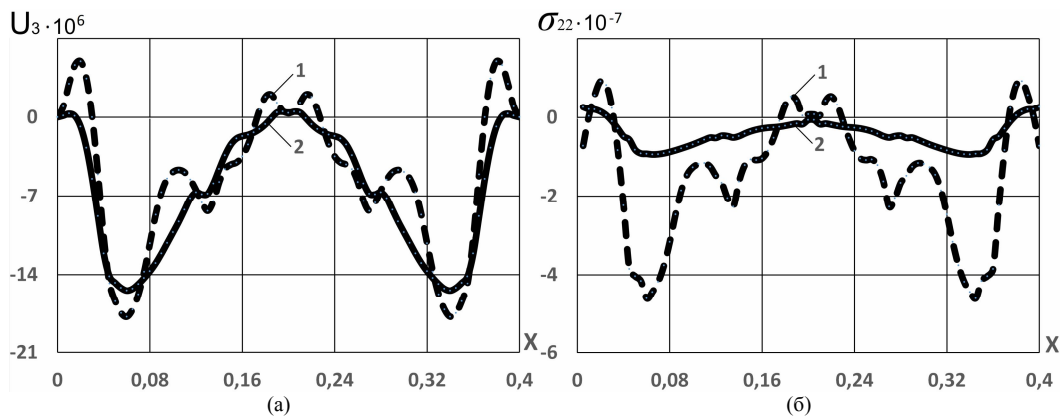


Рис. 6. Максимальні прогини  $u_3^1, u_3^2$  і напруження  $\sigma_{22}^1, \sigma_{22}^2$  в серединній поверхні несучих шарів при  $E_2/E_t = 50$

Максимальні величини нормального напруження внутрішнього шару  $\sigma_{22}^1$  (рис. 5б, 6б) у варіанті співвідношення  $E_1/E_t = 500$  перевищили аналогічні напруження  $\sigma_{22}^1$  структури при співвідношенні модулів  $E_2/E_t = 50$  майже на 50%, а максимальні напруження  $\sigma_{22}^2$  зовнішнього шару при розгляді відповідних варіантів цього випадку були більшими у 2,25 раз.

У останньому випадку досліджень геометричні і фізико-механічні параметрами структури становили:  $h_1 = 0,004\text{ м}$ ;  $h_2 = 0,002\text{ м}$ ;  $L/h_1 = 200$ ;  $R = 0,18\text{ м}$ ;  $R/h = 4,5$ ;  $H_j/h_1 = 17$ ;  $F_j = 3,4 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2$ ; модулі пружності несучих шарів і армуючих ребер  $E_1^1 = E_1^2 = E_j = 7 \cdot 10^{10}\text{ Па}$ ; коефіцієнт Пуассона  $\nu_1^1 = \nu_1^2 = \nu_j = 0,3$ ;  $\rho_1 = 2,7 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_2 = \rho_j = 2,7 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ . Параметри легкого заповнювача були наступні: модуль пружності  $E_t = 1,4 \cdot 10^8\text{ Па}$  і  $E_t = 1,4 \cdot 10^9\text{ Па}$ ; коефіцієнт Пуассона  $\nu_t = 0,33$ ; щільність  $\rho_t = 25\text{ кг/м}^3$ .

На рис. 7а наведені графіки максимальних прогинів коливальних процесів у серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 8,5T$ . В цьому варіанті співвідношення модулів пружності складає  $E_1/E_t = 500$ . Перші п'ять власних частот цієї тришарової структури становлять:  $f_1 = 2002,535\text{ Гц}$ ,  $f_2 = 2002,535\text{ Гц}$ ,  $f_3 = 2580,187\text{ Гц}$ ,  $f_4 = 2580,190\text{ Гц}$ ,  $f_5 = 2945,287\text{ Гц}$ .

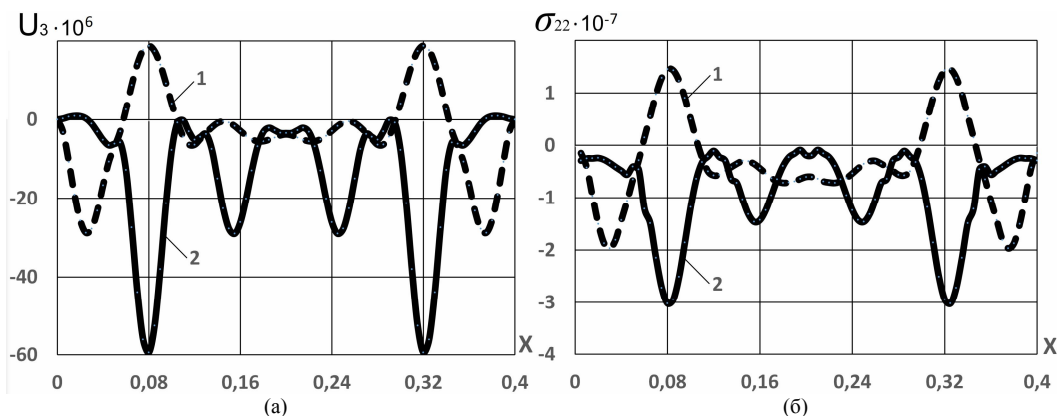


Рис. 7. Максимальні прогини  $u_3^1, u_3^2$  і напруження  $\sigma_{22}^1, \sigma_{22}^2$  в серединній поверхні несучих шарів при  $E_1/E_t = 500$

На рис. 7б наведені графіки максимальних напружень  $\sigma_{22}^1(1)$ ,  $\sigma_{22}^2(2)$  в серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 8,5T$ .

На рис. 8а наведені графіки максимальних прогинів коливальних процесів у серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 4,5T$ . В цьому варіанті структури співвідношення модулів пружності складає  $E_{1,2}/E_t=50$ .

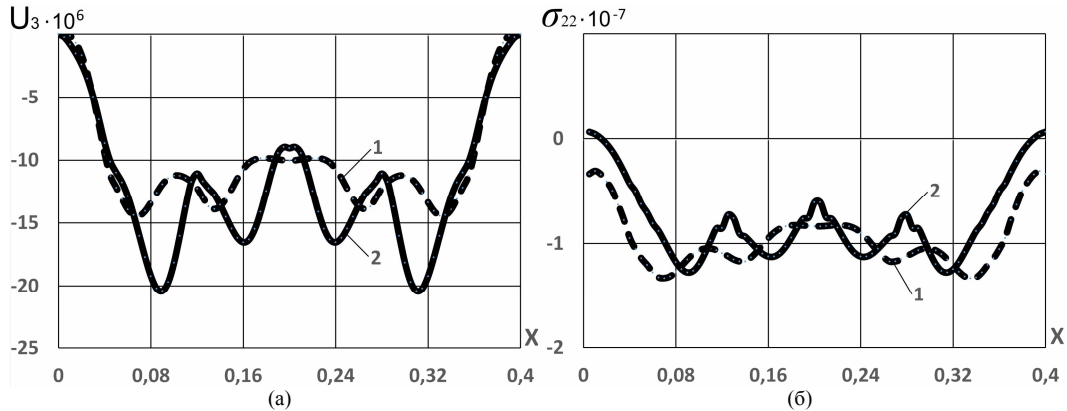


Рис. 8. Максимальні прогини  $u_3^1, u_3^2$  і напруження  $\sigma_{22}^1, \sigma_{22}^2$  в серединній поверхні несучих шарів при  $E_{1,2}/E_t=50$

Перші п'ять власних частот цієї тришарової структури становлять:  $f_1=2217,801$  Гц,  $f_2=2217,801$  Гц,  $f_3=3061,14$  Гц,  $f_4=3061,142$  Гц,  $f_5=3118,392$  Гц.

На рис. 8б наведені графіки максимальних напружень  $\sigma_{22}^1(1)$ ,  $\sigma_{22}^2(2)$  в серединних поверхнях несучих шарів від просторової координати  $x$  в момент часу  $t = 4,5T$ .

Аналіз отриманих результатів дослідження напружено-деформованого стану в серединних поверхнях несиметричної за товщиною несучих шарів тришарової структури останнього випадку (рис. 7а, 8а) показує, що у варіанті оболонки з співвідношенням  $E_{1,2}/E_t=500$  більшими за величиною були максимальні прогини зовнішнього шару  $u_3^2$  по відношенню до внутрішнього шару  $u_3^1$  оболонки.

Порівнюючи показники характеристик НДС варіантів структур з різною пружністю заповнювача видно, що при  $E_{1,2}/E_t=500$  максимальні прогини зовнішнього шару  $u_3^2$  перевищили аналогічні прогини  $u_3^1$  структури з заповнювачем  $E_{1,2}/E_t=50$  в 2,9 рази, при цьому максимальні прогини  $u_3^1$  внутрішніх шарів у даних варіантах відрізнялися в 2 рази.

Максимальні нормальні напруження внутрішнього шару  $\sigma_{22}^1$  (рис. 7б, 8б) при співвідношенні  $E_{1,2}/E_t=500$  перевищили аналогічні напруження  $\sigma_{22}^1$  структури співвідношенням  $E_{1,2}/E_t=50$  в 1,6 раз, а максимальні напруження  $\sigma_{22}^2$  зовнішнього шару першого варіанту перевищили аналогічні напруження  $\sigma_{22}^2$  зовнішнього шару другого варіанту структури майже у 2,4 рази.

Отже, загальною тенденцією всіх розглянутих випадків дослідження динаміки тришарової циліндричної оболонкової структури виявилось значне реагування нею на зміну модуля пружності легкого заповнювача, величина якого істотно впливає на її характер коливань [10-12].

**Висновок.** Досліджено вплив геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей матеріалу несучих шарів тришарових циліндричних оболонкових структур на їх напружено-деформований стан при осесиметричному внутрішньому нестационарному навантаженні. При аналізі елементів пружних структур використано модель теорії оболонок та стрижнів Тимошенко. Чисельні розрахунки максимальних величин нормальних прогинів  $u_3$  і нормальних напружень  $\sigma_{22}$  в серединних поверхнях несучих шарів оболонок, отримані

скінченно-елементним методом, показують що параметри геометрії несучих шарів структури, фізико-механічні властивості їх матеріалу і пружність заповнювача значно впливають на динаміку коливальних процесів циліндричних оболонкових структур.

Таким чином змінюючи матеріал пакету циліндричної оболонки, товщину несучих шарів і пружність заповнювача можна підібрати конструкцію структури з прогнозованою динамічною поведінкою при нестационарному навантаженні.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бабаев А.Э., Кубенко В.Д.* Нестационарная аэроупругость слоистых оболочек. В кн.: Механика композитов (под ред. А.Н. Гузя): в 12-и т.9. Динамика элементов конструкций.- Киев: А.С.К., 1999. – с. 247-261.
2. *Головко К.Г., Луговой П.З., Мейш В.Ф.* Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках (под ред. акад. НАН Украины А.Н. Гузя).– Киев: Изд. – полиграф. центр «Киевский ун-т», 2012. – 541 с.
3. *Луговой П.З., Мейш В.Ф., Мейш Ю.А.* Динаміка конструктивно-неоднорідних оболонкових структур: монографія– К.: Ліра-К, 2022. – 336 с.
4. *Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки.–М.: Наука, 1966.– 636 с.
5. *Рычков С. П.* Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 784 с.
6. *Смельянова Т.А.* Розв'язуюче рівняння вільних коливань тришарової циліндричної оболонки, яка підкріплена ребрами жорсткості – Вісник Херсонського нац. техн. ун-ту. – 2016. – 2, №57. -с.11-16.
7. *Луговой П.З., Мейш В.Ф.* Численное моделирование динамического поведения и расчет на прочность многослойных оболочек при импульсном нагружении – Проблемы прочности.–2000–№4 – с.86-96.
8. *Meish V.F., Shrantzel S.E.* Dynamic problems in the theory of sandwich shells of revolution with a discrete core under nonstationary loads. – Int. Appl. Mech. -2002.-38, №12. – p.1501-1507.
9. *Мейш В.Ф.* До розрахунку нестационарних коливань тришарових пологих циліндричних оболонок з дискретним ребристим наповнювачем / Мейш В.Ф., Мейш Ю.А., Таєверє Д.А. // Вісник Національного транспортного ун – ту. Ч. 2. – Київ: НТУ, 2008. – Вип. 17. – С. 409 – 414.
10. *Gaidachuk V.V., Kotenko K.E., Lavinsky D.S.* Impact of elasticity of polymer filler of three-layer cylindrical structure of elliptical section on its behavior under internal impulse loading / Опірматеріалів і теоріяспоруд: науково-техн. збірн.– К.: КНУБА, 2022, № 109. – P. 467-472.
11. *Lugovoi P. Z., Gaidachuk V.V., Skosarenko Yu.V., Kotenko K.E.* Stress–Strain State of Three-Layer Cylindrical Shells with Reinforced Light Core Under Nonstationary Loading "International Applied Mechanics", 2021, 57(4), P. 395–404.
12. *Gaidachuk V.V., Kotenko K.E.* Stress - strain state of a three-layer cylindrical shell under internal axisymmetric pulse load c Strength of Materials and Theory of Structures. – 2020. – Issue. 105. – P.– 145-151.

#### REFERENCES

1. *Babaev A.E., Kubenko V.D.* Nestatsionarnaya aerouprugost sloistyih obolochek. V kn.: Mehanika kompozitov (pod red. A.N. Guzya): v 12-i t.9. Dinamika elementov konstruktсий (Unsteady Aeroelasticity of Layered Shells. In: Mechanics of Composites (ed. by A.N. Guzy): in 12 volumes. 9. Dynamics of Structural Elements).- Kiev: A.S.K., 1999. – s. 247-261
2. *Golovko K.G., Lugovoi P.Z., Meish V.F.* Dinamika neodnorodnyh obolochek pri nestatsionarnykh nagruzkakh (Dynamics of inhomogeneous shells under unsteady) – Kiev: Izd. – poligraf. centr «Kievskij un-t», 2012. – 541 s.
3. *Lugovij P.Z., Meish V.F., Meish Yu.A.* DYNAMIKA KONSTRUKTYVNO-NEODNORIDNYH OBOLONKOVYKH STRUKTUR: MONOGRAFIYA (Dynamics of structurally inhomogenous shell structures: monograph) – K.: Lira-K, 2022. – 336 s.
4. *Timoshenko S.P., Vojnovskij-Kriger S.* Plastinki i obolochki (Plates and shells) – М.: Nauka, 1966. – 636 s.
5. *Rychkov S. P.* Modelirovanie konstrukcij v srede Femap with NX Nastran (Modeling of structures in the Femap with NX Nastran environment)– М.: ДМК Press, 2016. – 784 s.
6. *Yemelianova T.A.* Rozv'язuieche rivniannia vilnykh kolyvan trysharovoї tsylindrychnoi obolonky, yaka pidkreplena rebramy zhorstkosti (Solving equation of free oscillations of a three-layer cylindrical shell supported by stiffeners) – Visnyk Khersonskoho nats. tekhn. un-tu. – 2016. – 2, №57. -s. 11-16.
7. *Luhovyi P.Z., Meish V.F.* Chylennoe modelyrovanye dynamycheskoho povedenya i raschet na prochnost mnogoslounkh obolochek pry impulsnom nahruzhenny (Numerical modeling of dynamic behavior and strength calculation of multilayer shells under pulse loading) – Problemi prochnosti. – 2000–№4 – s. 86-96.
8. *Meish V.F., Shrantzel S.E.* Dynamic problems in the theory of sandwich shells of revolution with a discrete core under nonstationary loads. – Int. Appl. Mech. -2002.-38, №12. – p.1501-1507.
9. *Meish V.F.* Do rozrakhunku nestatsionarnykh kolyvan trysharovykh polohykh tsylindrychnykh obolonok z dyskretnym rebrystym napovniuvachem (To the calculation of non-stationary oscillations of three-layer hollow cylindrical shells with a discrete ribbed filler) / Meish V.F., Meish Yu.A., Taievere D.A. // Visnyk Natsionalnoho transportnoho un – tu. Ch. 2. – Kyiv: NTU, 2008. – Vyp. 17. – S. 409 – 414. Visnyk Natsionalnoho transportnoho un – tu. Ch. 2. – yiv: NTU, 2008. – Vyp. 17. – S. 409 – 414.
10. *Gaidachuk V.V., Kotenko K.E., Lavinsky D.S.* Impact of elasticity of polymer filler of three-layer cylindrical structure of elliptical section on its behavior under internal impulse loading / Опірматеріалів і теоріяспоруд: науково-техн. збірн.– К.: КНУБА, 2022, № 109. – P. 467-472.
11. *Lugovoi P.Z., Gaidachuk V.V., Skosarenko Yu.V., Kotenko K.E.* Stress–Strain State of Three-Layer Cylindrical Shells with Reinforced Light Core Under Nonstationary Loading "International Applied Mechanics", 2021, 57(4), P. 395–404.
12. *Gaidachuk V.V., Kotenko K.E.* Stress - strain state of a three-layer cylindrical shell under internal axisymmetric pulse load c Strength of Materials and Theory of Structures. – 2020. – Issue. 105. – P.– 145-151.



Гайдайчук В.В., Котенко К.Е., Клименко М.О.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕСУЧИХ ШАРІВ І ПОЛІМЕРНОГО ЗАПОВНЮВАЧА НА КОЛИВАЛЬНИЙ ПРОЦЕС ШАРУВАТОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Досліджені динамічні перехідні процеси та наведені результати оцінки впливу геометричних і фізико-механічних параметрів несучих шарів і полімерного заповнювача на поведінку тришарової циліндричної оболонкової структури при нестационарному імпульсному навантаженні.

Використана модель теорії оболонок і стержнів С.П. Тимошенка враховуюча незалежні статичні і кінематичні гіпотези до кожного шару структури.

Виконані чисельні розрахунки нормальних прогинів  $u_3$  і нормальних напружень  $\sigma_{22}$  несучих шарів структури, визначаючих її напружено-деформований стан (НДС).

Розглянуто варіанти структури з дискретно-симетричним армованим ребрами заповнювачем різної пружності. Приведено порівняльний аналіз прогинів і напружень несучих шарів структури параметрах легкого заповнювача:  $E_1/E_t = 500$  і  $E_1/E_t = 50$ .

Загальною тенденцією всіх розглянутих випадків дослідження динаміки тришарової циліндричної оболонкової структури виявилось значне реагування нею на зміну модуля пружності легкого заповнювача, величина якого істотно впливає на характер її коливань.

**Ключові слова:** тришарова циліндрична оболонка, скінченно-елементна модель, полімерний заповнювач, нестационарне навантаження, несучий шар.

Gaidaichuk V.V., Kotenko K.E., Klymenko M.O.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC AND PHYSICO-MECHANICAL PARAMETERS OF BEARING LAYERS AND POLYMER FILLER ON THE OSCILLATION PROCESS OF A LAYERED CYLINDRICAL SHELL AT NON-STATIONARY LOAD**

Dynamic transient processes are studied and the results of the assessment of the influence of geometrical, physical and mechanical parameters of bearing layers and polymer aggregate on the behavior of a three-layer cylindrical shell structure under non-stationary impulse loading are given.

The used model of the theory of shells and rods by S.P. Timoshenko, taking into account independent static and kinematic hypotheses for each layer of the structure.

Numerical calculations of normal deflections and normal stresses of the load-bearing layers of the structure, which determine its stress-strain state (STS), have been performed. The finite-element model was created using a three-dimensional volumetric finite element of the Solid type, which, according to quality criteria: narrowing and curvature, internal angles and other indicators, met the requirements for providing a calculation mesh at the finite-element level.

Variants of the structure with discrete-symmetric rib-reinforced aggregate of different elasticity are considered. A comparative analysis of the deflections and stresses of the load-bearing layers of the structure with the parameters of the light aggregate is given:  $E_{1,2}/E_t=500$  and  $E_{1,2}/E_t=50$ .

The general trend of all the considered cases of the study of the dynamics of the three-layer cylindrical shell structure was found to be a significant response to the change in the modulus of elasticity of the light aggregate, the value of which significantly affects the nature of its oscillations.

The article shows that the parameters of the geometry of the bearing layers of the structure, the physical and mechanical properties of their material, and the elasticity of the aggregate significantly affect the dynamics of oscillatory processes of cylindrical shell structures under non-stationary loading.

**Key words:** three-layer cylindrical shell, polymer aggregate, finite element model, non-stationary load, bearing layer.

УДК 539.3

Гайдайчук В.В., Котенко К.Е., Клименко М.О. Дослідження впливу геометричних і фізико-механічних параметрів несучих шарів і полімерного заповнювача на коливальний процес шаруватої циліндричної оболонки при нестационарному навантаженні // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – Київ: КНУБА, 2024. – Вип. 113. – С. 161-170.

Лл. 8. Бібліогр. 12 назв.

UDC621.87

Gaidaichuk V.V., Kotenko K.E., Klymenko M.O. Investigation of the influence of geometric and physico-mechanical parameters of bearing layers and polymer filler on the oscillation process of a layered cylindrical shell at non-stationary load// Strength of Materials and Theory of Structure: Scientific and technical collected articles. – Kyiv: KNUCA, 2024. – Issue 113. – P. 161-170.

Fig. 8. Ref. 12.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури Гайдайчук Віктор Васильович.

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, к. 433, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра теоретичної механіки

**Роб. тел.** +380 (44) 241-55-72

**E-mail:** viktor\_gaydaychuk@bigmir.net

**ORCIDID:** <https://orcid.org/0000-0003-2059-7433>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки, професор Київського національного університету будівництва і архітектури Котенко Костянтин Едуардович.

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, к. 433, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра теоретичної механіки

**Роб. тел.** +380 (44) 241-55-72

**E-mail:** 1969box@mail.ru

**ORCIDID:** <https://orcid.org/0000-0002-3181-3819>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів, Київський національний університет будівництва і архітектури, Клименко Микола Олександрович

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, к. 501, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра машин і обладнання технологічних процесів

**Роб. тел.** +380 (44) 241-55-48

**E-mail:** klymenko.mo@knuba.edu.ua

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-6166-8966>