

SECTION 9. MECHANICAL ENGINEERING

9.1 Напружено - деформований стан тришарових оболонок. Вплив форми і розмірів

В сучасній практиці будівництва і машинобудування значна роль відводиться використанню конструкцій композитних оболонок. Найбільш розповсюджені серед них є тришарові оболонки циліндричної, конічної і сферичної форм та їх комбіновані з'єднання.

Стінки цих структур включають внутрішню і зовнішню металеві обшивки і внутрішній полімерний заповнювач з можливим його армуванням (рис. 1).

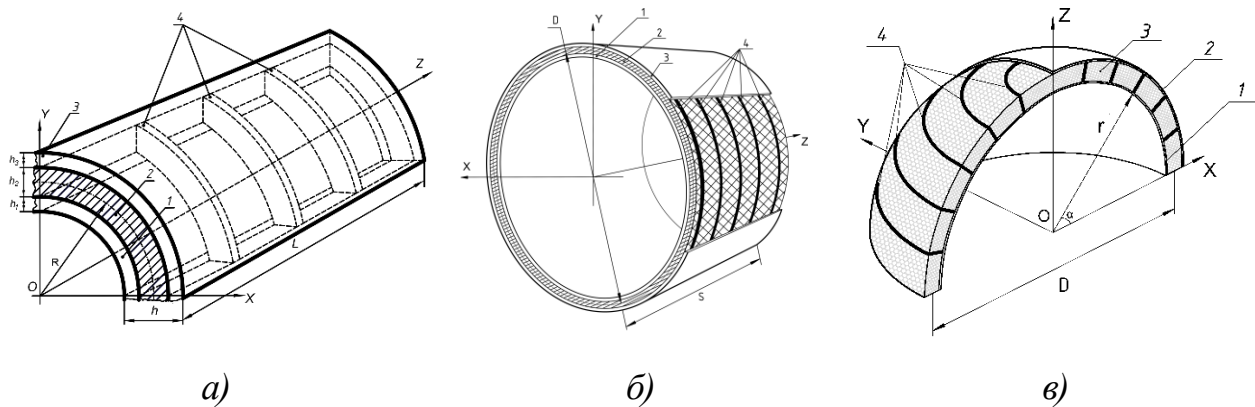


Рисунок 1. Конструкції оболонкових структур:

а) циліндричної; б) конічної; в) сферичної

1 – внутрішній шар; 2 – полімерний заповнювач; 3 – зовнішній шар;

4 – армуючі ребра

Така конструкція оболонки дозволяє зменшувати металоємність і вагу структури і, завдяки оптимальному поєднанню геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей її матеріалів, забезпечити високу надійність конструкції. Особливе значення при цьому може мати вплив форми і розмірів структури на її напружено - деформований стан. Значимість такого впливу досліджувалась на трьох тришарових циліндричних оболонках без армування полімерного заповнювача при внутрішньому осесиметричному імпульсному навантаженні цих структур. Всі циліндричні тришарові оболонки були однакової довжини L , мали однакову товщину обшивки (рис. 2) і відрізнялися формою і

розмірами поперечного перерізу (табл. 1) та мали наступні абсолютні значення: $R = 100$ мм, $h_1 = h_3 = 5$ мм, $h_T = 10$ мм, $L = 400$ мм.

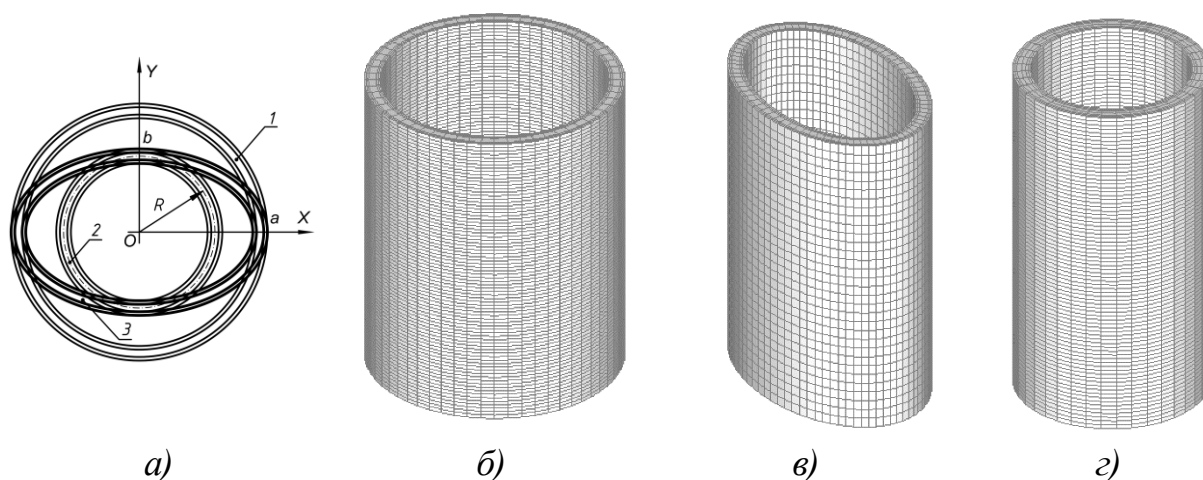


Рисунок 2. Тришарові циліндричні оболонки з різною формою поперечного перерізу:
а) типи форм перерізу; б) переріз круговий типу 1; в) переріз еліптичний;
з) переріз круговий типу 2

Таблиця 1.

Співвідношення розмірів досліджуваних структур

Типи форми перерізу	$\frac{R}{h_1}$	$\frac{a}{h_1}$	$\frac{b}{h_1}$
Круговий 1	31		
Еліптичний		31	20
Круговий 2	20		

Позначення: a - піввісь еліпсу велика ; b - теж саме мала

Розподіл імпульсного навантаження $Q(t)$ здійснювався, згідно приведеному на рис. 3 і мав часовий інтервал $0 \leq t \leq 10T$:

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

де: $\eta(t)$ – функція Хевісайда;

A – амплітуда імпульсного навантаження;

T – тривалість часу навантаження; t – часовий інтервал.

Параметри навантаження приймалися відповідно: $A = 10^6$ Па; $T = 50 \cdot 10^{-6}$ с, а фізико -

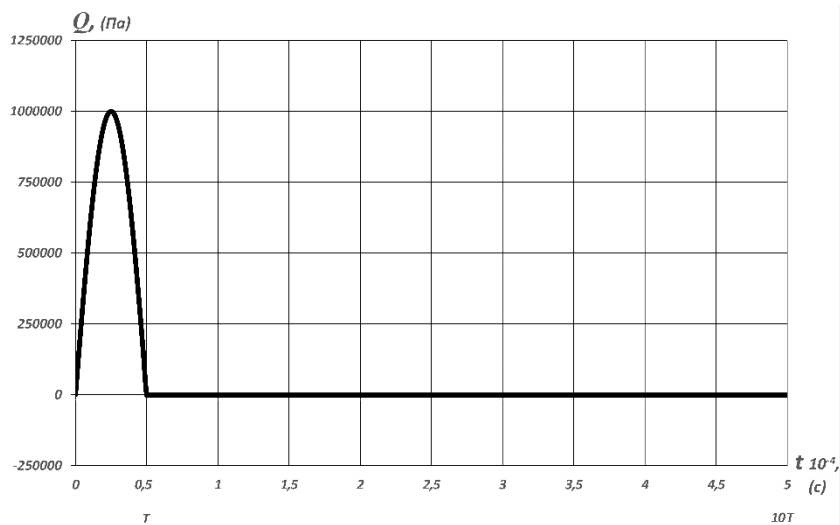


Рисунок 3. Розподіл імпульсного навантаження $Q(t)$

механічні характеристики мали такі значення: $E_1 = E_3 = 70$ ГПа, $E_T = 0,14$ ГПа, $\mu_1 = \mu_3 = 0,3$, $\rho_1 = \rho_3 = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³.

Напружено - деформований стан оболонкових структур оцінювався величинами нормальних прогинів несучих шарів (u_3^1 - внутрішнього шару; u_3^2 - зовнішнього шару) і нормальних напружень (σ_{22}^1 та σ_{22}^2) при досягненні ними максимального значення у розглядаєний інтервал часу $0 \leq t \leq 10T$.

Вплив конструкційних факторів на напружено - деформований стан оболонкових структур дозволяє визначати аналітичний метод включаючи створення і розрахунки диференціальних рівнянь руху таких структур в рамках лінійного варіанту теорії тонкостінних оболонок типу Тимошенко [135]. Прикладом може бути використання диференціальних рівнянь коливань оболонок некругового перерізу наведених в роботі [136]. Але, як показує практика, такий підхід являється недостатньо ефективним, а в ряді випадків навіть неможливим. Це стосується його неоперативності і необхідності створення та розрахунків рівнянь високих порядків. А використання скінченно - різницевого методу розрахунків хоч і спрощує розрахунки, але робить процес досить затяжним. Більш ефективним в цьому відношенні представляється використання скінченно - елементного моделювання структур і проведення розрахунків досліджуваних характеристик програмно

- розрахунковими комплексами. Базуючись на використанні потенційної енергії, скінченно - елементний метод розповсюджується практично на необмежений клас задач і являється досить ефективним і оперативним. В загальній постановці цей метод передбачає визначення області і вектора переміщень пружної системи характеризуючогося мінімізацією її потенційної енергії, а після її визначення – розраховуються тензори переміщень і напружень даної системи [137]. І якщо повна потенційна енергія системи має вид:

$$\Pi = E - W, \quad (2.1)$$

де:

E – потенційна енергія деформацій, а W – потенційна енергія зовнішніх навантажень, то після розбивки цільної області на окремі елементи потенційна енергія системи змінюється відповідно:

$$\Pi = \sum_{e=1}^E (E^{(e)} - W^{(e)}) = \sum_{e=1}^E \pi^{(e)} \quad (2.2)$$

і її мінімізація, в результаті впливу силових, теплових або інших факторів забезпечує вирішення задачі.

Грунтуючись на такому підході, були створені скінченно - елементні моделі представлених вище тришарових циліндричних структур і виконані розрахунки нормальних прогинів і нормальних напружень у серединних поверхнях несучих шарів. Покладалось, що краї оболонок жорстко затиснені.

При створенні скінченно - елементних моделей використовувався тривимірний об'ємний скінченний елемент типу *Solid*, який по ступеню увігнутості, звуженню і закривленню, та іншим показникам [138] відповідав вимогам забезпечення якості скінченно - елементної сітки. Створенні скінченно - елементні моделі налічували відповідно: в моделі кругового перерізу типу 1: елементів – 19200, вузлів – 22680, в моделі кругового перерізу типу 2: елементів – 19200, вузлів – 22680, а при еліптичному перерізі: 12800 елементів і 15840 вузлів. Розрахунки величин нормальних прогинів і нормальних напружень здійснювались у програмно - розрахунковому комплексі *Nastran* алгоритмом

прямого перехідного динамічного процесу, виконані для області $D = \{0 \leq S_1 \leq L, 0 \leq S_2 \leq A_2 \pi/2\}$. Отримані результати приведені на рис. 4 та рис. 5 і представлені в формі залежностей нормальних прогинів для несучих шарів u_3^1 і u_3^2 від поздовжньої координати та нормальних напружень σ_{22}^1 та σ_{22}^2 в момент часу коли їхні величини досягали максимальних значень. Також указані моменти часу коли ці показники досягали максимальних величин. Тут, і в подальших графіках, крива з індексом 1 відповідає відповідно величинам нормальних прогинів і нормальних напружень внутрішнього шару структур, а крива 2 - цих показників зовнішнього шару. Нормальні прогини обшивних шарів у всіх досліджуваних структурах виявились однонаправленими, але значно відрізнялися за величиною. В структурах кругового перерізу типу 2 величина прогину u_3^1 перевищила на 64,8% прогин u_3^2 , а в оболонці типу 1 - навпаки. Максимальна величина прогину u_3^2 перевищила прогин u_3^1 на 54,7%.

При еліптичній формі перерізу максимальна величина прогину зафіксована у внутрішньому шарі оболонки в напрямку осі Y. Вона на 35,7% перевищила прогин цього шару в напрямку осі X. А прогини зовнішнього шару в обох напрямках виявились практично однаковими.

Нормальні напруження в робочих шарах оболонок (рис. 5) також мають ряд відмінностей. В структурі кругового перерізу типу 2 більш напруженим виявився внутрішній шар оболонки. Максимальна величина σ_{22}^1 на 67,3% перевищила величину напруження зовнішнього шару σ_{22}^2 , а в оболонці типу 1 більш напруженим виявився зовнішній шар оболонки.

Максимальна величина нормальних прогинів внутрішнього шару кругового перерізу типу 2 виявилась на 69,4% меншою ніж величина прогинів аналогічного шару в структурі еліптичного перерізу в напрямку осі Y. А максимальна величина прогинів внутрішнього шару в структурі кругового перерізу типу 1 виявилась на 78,3% меншою

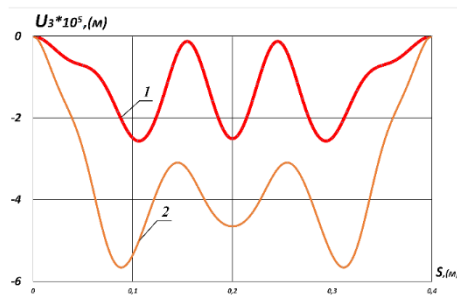
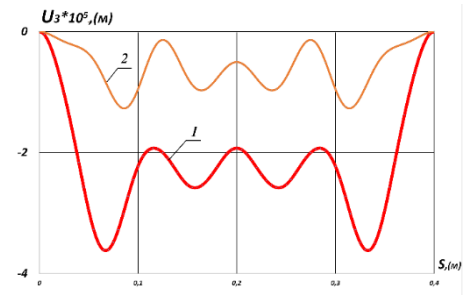
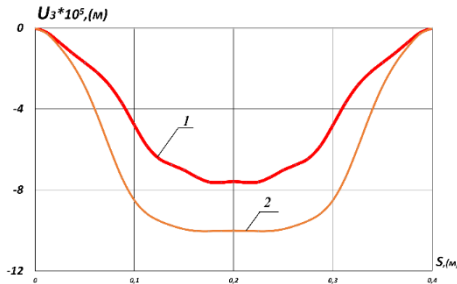
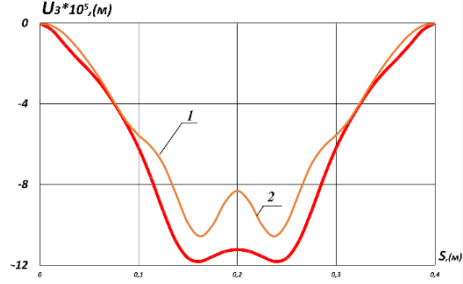
a) $npu \ t=6,9T$ b) $npu \ t=5,8T$ c) $npu \ t=2,9T$ d) $npu \ t=4,55T$

Рисунок 4. Нормальні прогини несучих шарів циліндричних структур кругового перерізу :
a) – типу 1; b) – типу 2;

еліптичного перерізу : c) вздовж осі X ; d) вздовж осі Y

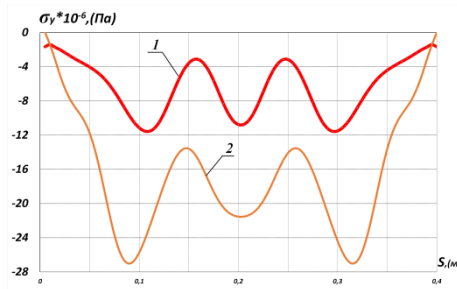
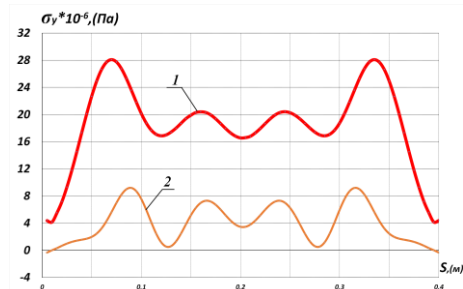
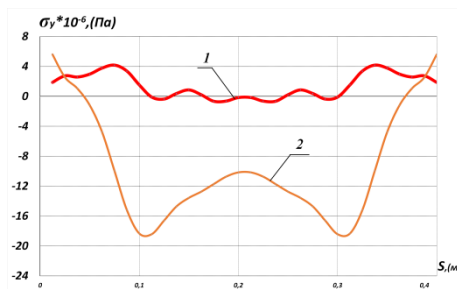
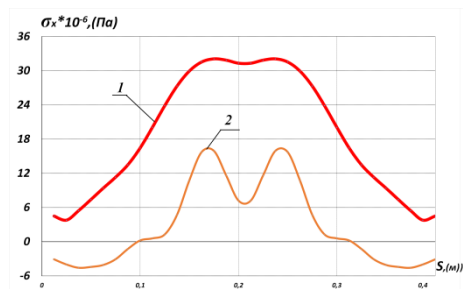
a) $npu \ t=6,9T$ b) $npu \ t=5,8T$ b) $npu \ t=2,9T$ d) $npu \ t=4,55T$

Рисунок 5. Нормальні напруження несучих шарів циліндричних структур :

a) – оболонка кругового перерізу типу 1; b) – теж саме типу 2;

c) – оболонка еліптичного перерізу σ_y ; d) – теж саме σ_x

від прогину аналогічного шару структури еліптичного перерізу в напрямку осі X .

Менш контрастний характер величин і розподіл нормальних прогинів та нормальних напружень виявився і в інших формах тришарових оболонкових структурах при аналогічних параметрах їх імпульсних осесиметричних навантажень. Дослідження величин цих показників в конічній тришаровій структурі (рис. 6) з кутами конусності α [139], які дорівнювали 10° і 20° , а довжина утворюваної становила $S = 295$ мм,

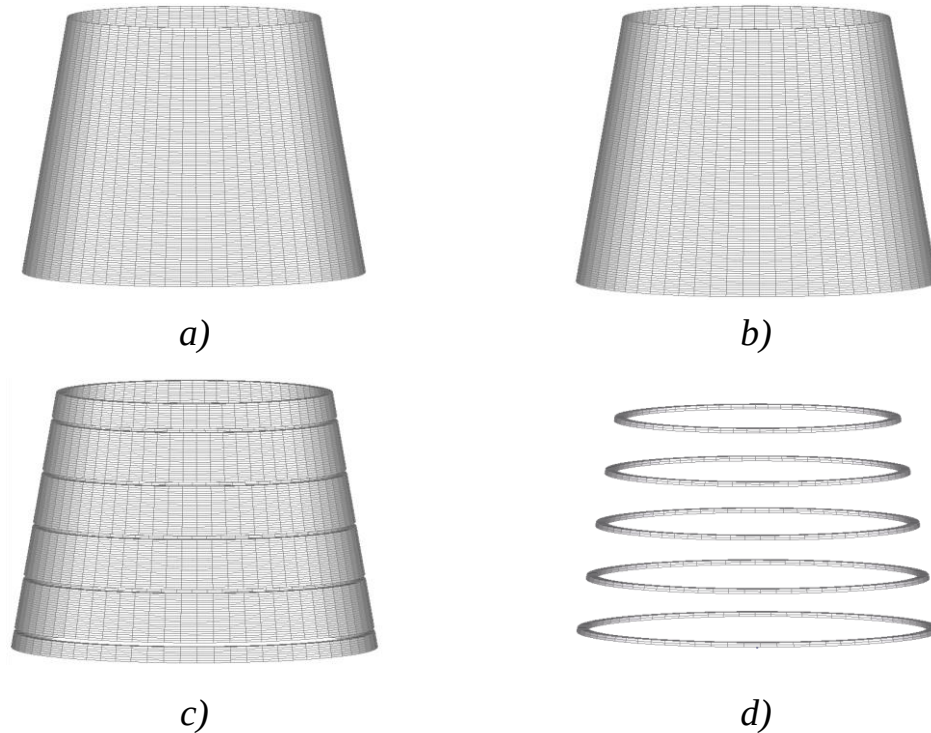
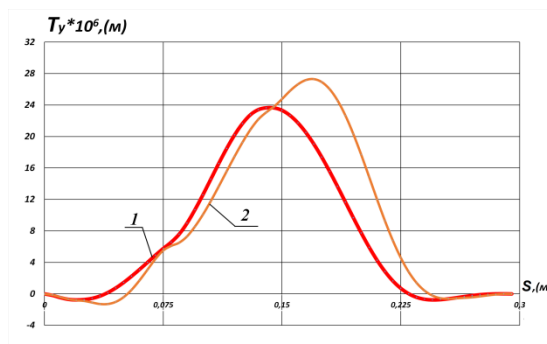


Рис. 6. Скінченно - елементна модель тришарової конічної оболонки:

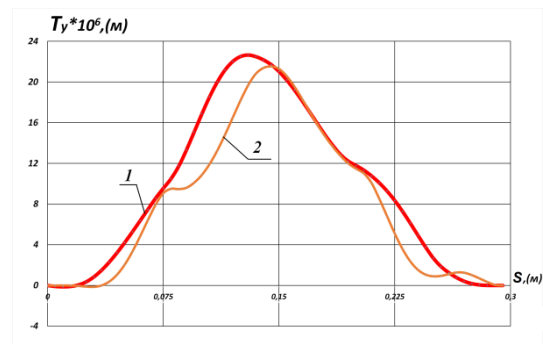
a – обшивка несуча внутрішня; b – теж саме зовнішня; c – полімерний заповнювач;

d – армуючі ребра

показали, що нормальні прогини робочих шарів (рис. 7) при $t = 5,7T$ являються



$a)$ при $t = 5,7T$

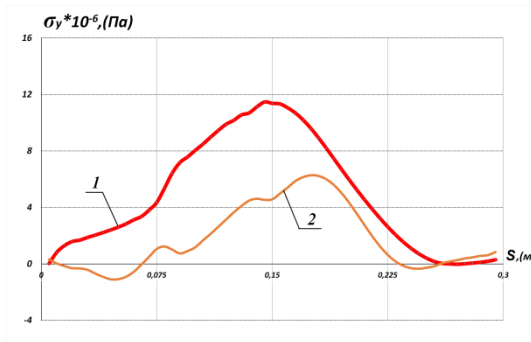


$b)$ при $t = 5,7T$

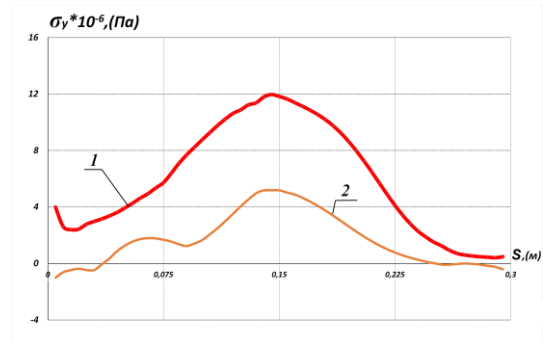
Рисунок 7. Нормальні прогини конічної структури з кутами конусності:

$a)$ $\alpha = 10^\circ$; $b)$ $\alpha = 20^\circ$

досить близькими за величиною і формою розподілу вздовж утворювальних, а більш напруженим в них виявився зовнішній шар (рис. 8).



a) при $t=5,7T$

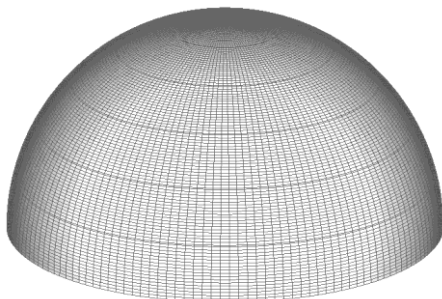


b) при $t=5,7T$

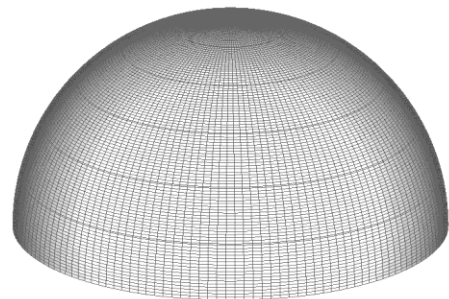
Рисунок 8. Нормальні напруження σ_y несучих шарів оболонки з кутами конусності:

a) $\alpha = 10^\circ$; b) $\alpha = 20^\circ$

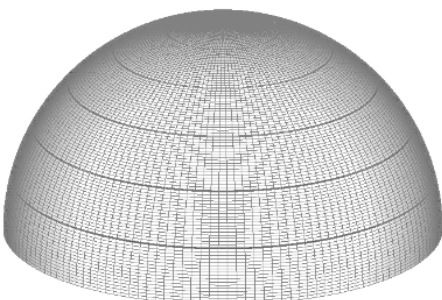
Подібне співвідношення цих параметрів було виявлено і в тришарових півсферичних оболонках з армованим заповнювачем (рис. 9) при аналогічному навантаженні [140].



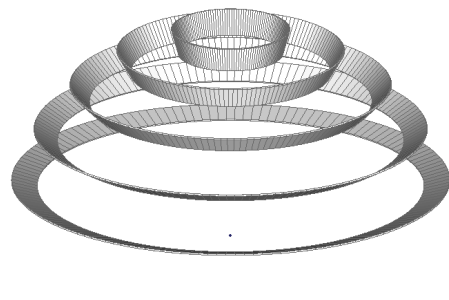
a)



b)



c)



d)

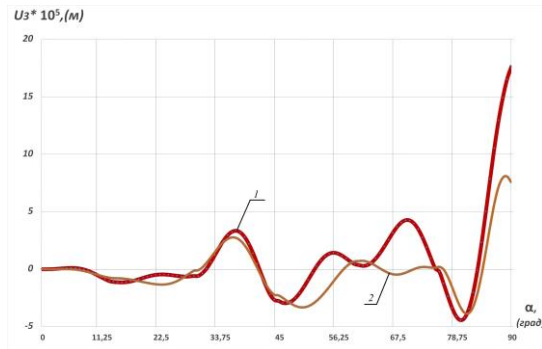
Рисунок 9. Скінченно - елементна модель тришарової півсферичної оболонки:

a) – обшивка несуча внутрішня; b) – та ж саме зовнішня; c) – полімерний заповнювач;

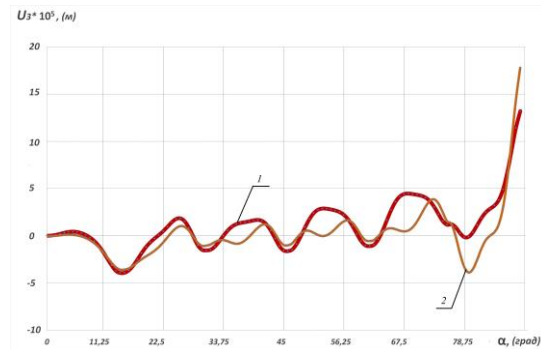
d) – армуючі ребра

Результати максимальних нормальних прогинів несучих шарів півсферичних тришарових структур діаметром $D=300$ мм та $D=600$ мм приведені на рис. 10. Як видно, переміщення обох шарів структур досягають максимумів близько полюсів структур при

$$\alpha = \frac{\pi}{2}.$$



a) $npu t=8,25T$



b) $npu t=7,7T$

Рисунок 10. Нормальні прогини несучих шарів півсферичних тришарових структур діаметром:

a) $D=300$ мм; b) $D=600$ мм

Близькі за величиною контролюванні показники несучих шарів двох останніх структур очевидно являються результатом впливу на напружено - деформований стан структур армування полімерного заповнювача дискретними ребрами, які жорстко з'єднують несучі шари структур.

Отримані результати дозволяють констатувати, що форми і розміри тришарових оболонкових структур, можуть значно впливати на їх напружено - деформований стан. Врахування і мінімізація їх негативного впливу і завчасне його попередження представляється одним із орієнтирів забезпечення надійності цих структур. До таких заходів можна віднести використання полімерного заповнювача з більш високими фізико - механічними властивостями, армування його дискретними ребрами, забезпечення жорсткого зв'язку між ребрами і робочими шарами структур, збільшення товщин несучих шарів та інші рішення.