

5.4 Вплив армування полімерного заповнювача на динаміку тришарових оболонкових структур

Конструкторсько-технологічні рішення сучасних машин, механізмів, будівельних і інших конструкцій часто використовують елементи і деталі шаруватих оболонок. Це зменшує металоємність і вагу конструкцій та дозволяє, завдяки використанню підвищеної стійкості оболонок до динамічних впливів, забезпечувати надійність конструкцій та гарантувати їх довговічність. Тому особливе значення має визначення цих факторів і оцінка ступеню їх впливу на динаміку шаруватих структур.

В шаруватих оболонках одним із таких факторів може бути армування їх полімерного заповнювача металевими ребрами жорсткості. Щоб визначити характер і значимість впливу цього фактора досліджується динаміка двох конструкцій тришарових структур [316,317]: циліндричної оболонки нормального еліптичного перетину (рис. 1) і півсферичної (рис. 2).

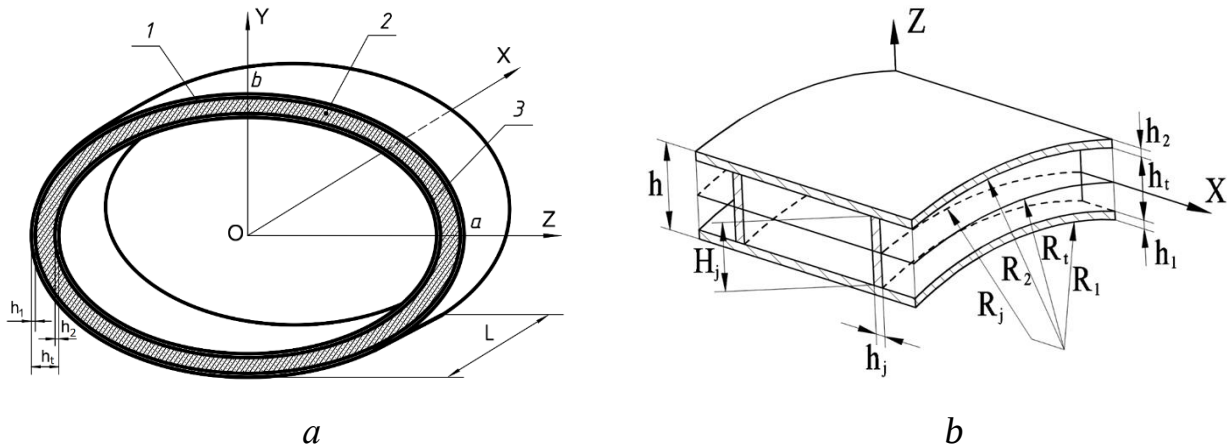


Рисунок 1. Конструкція тришарової циліндричної оболонкової структури

a – без армуючих ребер; b – з армуючими ребрами.

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

4 – армуючі ребра

Несучі шари (внутрішні і зовнішні) обох структур $h_1 = h_2 = 0,001$ м і виготовлені із матеріалу з однаковими фізико-механічними властивостями. Модуль пружності матеріалу несучих шарів та армуючих ребер заповнювача

$E_1 = E_2 = 7 \cdot 10^{10}$ Па, його щільність $\rho_1 = \rho_2 = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, коефіцієнт Пуассона $\mu_1 = \mu_3 = 0,3$, щільність заповнювача $\rho_t = 25$ кг/м³. Загальна товщина стінки циліндричної структури становить $h = 0,010$ м, а сферичної – $h = 0,012$ м. Співвідношення модулів пружності матеріалу несучих шарів і полімерного заповнювача E_t у циліндричній структурі $E_1 / E_t = 500$, а у сферичній $E_1 / E_t = 3,5 \cdot 10^3$.

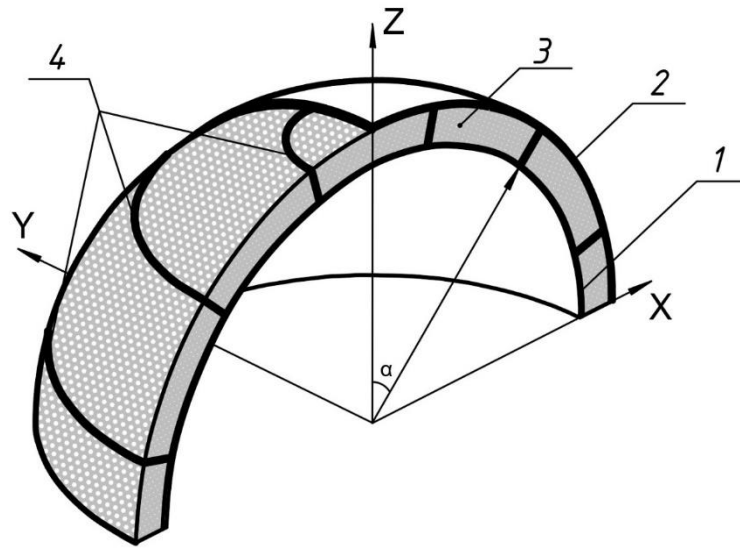


Рисунок 2. Конструкція тришарової півсферичної оболонкової структури:

1 – внутрішній шар; 2 – зовнішній шар; 3 – полімерний заповнювач; 4 – армуючі ребра

Інші геометричні параметри для циліндричної структури:

$$L = 0,40 \text{ м}, \quad \frac{L}{h_1} = 0,4; \quad \frac{b}{h_1} = 0,1, \quad \frac{a}{b} = 1,10; \quad F_j = H_j \cdot h_j = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2,$$

для сферичної:

$$R_t = 0,3 \text{ м}; \quad h_j = 10h_1 \text{ м}, \quad F_j = H_j \cdot h_j = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Армуючі ребра (паралелі) знаходились в точках циліндричної структури:

$$x_j = [16 + 17(k-1)]\Delta x, \quad k = \overline{1, 5}, \quad \Delta x = \frac{L}{100}, \quad \text{де } k - \text{кількість ребер прийнята}$$

в розрахунках.

Для сферичної структури ребра розташовувались згідно:

$$\alpha_k = [41 + 40(k-1)]\Delta\alpha_1, \quad k = \overline{1, 3}, \quad \Delta\alpha_1 = (\pi/2)/160$$

Динамічна поведінка обох структур оцінювалася величинами нормальних прогинів серединних поверхонь несучих шарів та їх нормальними напруженнями.

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

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

де:

$\eta(t)$ – функція Хевісайда;

A – амплітуда імпульсного навантаження;

T – тривалість часу навантаження; t – часовий інтервал.

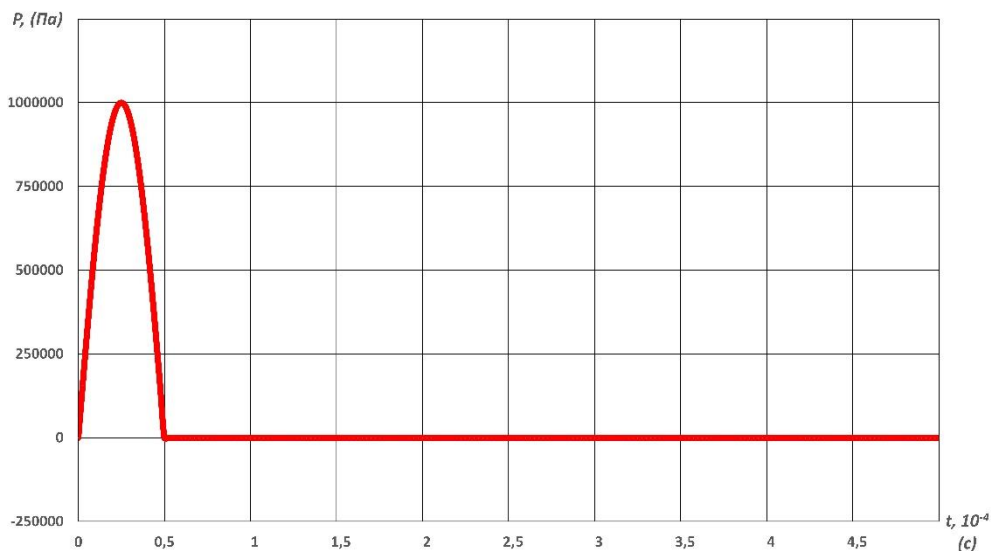


Рисунок 3. Розподіл імпульсного навантаження $P(t)$

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

Покладається, що краї оболонок жорстко затиснені:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0.$$

Як і в інших дослідженнях тришарових оболонкових структур [318-322] величини прогинів і напружень визначалися скінченно-елементним методом і здійснювались у програмно-розрахунковому комплексі *Fimap with NX Nastran* алгоритмом прямого перехідного динамічного процесу.

В загальній постановці скінченно-елементним 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 [323]. І якщо повна потенційна енергія системи має вид:

$$\Pi = E - W, \quad (2)$$

де:

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

$$\Pi = \sum_{e=1}^E (E^{(e)} - W^{(e)}) = \sum_{e=1}^E \pi^{(e)} \quad (3)$$

Глобальна матриця жорсткості $[K]$ і глобальний вектор-стовпець $\{F\}$ в матричному рівнянні:

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (4)$$

відповідають співвідношенням:

$$[K] = \sum_{e=1}^E [k^{(e)}], \quad \{F\} = - \sum_{e=1}^E \{f^{(e)}\} \quad (5)$$

Мінімізація повної потенційної енергії системи, в результаті впливу силових, теплових або інших факторів забезпечує вирішення задачі.

Скінченно-елементний метод хоч і є досить універсальним і ефективним, але його використання потребує професійних навичок, а в окремих випадках, навіть інтуїтивного відчуття ситуації. При визначенні даним методом величин нормальних прогинів і напружень створені скінченно-елементні моделі (рис. 4) врахували конструктивні особливості оболонкових структур. У скінченно - елементних моделях використовувався тривимірний об'ємний скінченний елемент типу *Solid*, який по ступеню увігнутості, звуженню і закривленню, внутрішнім кутам та інших показниках відповідав вимогам забезпечення якості скінченно - елементної сітки [324]. Скінченно-елементна модель тришарової циліндричної оболонки налічувала 120000 скінченних елементів і 141400 вузлів.

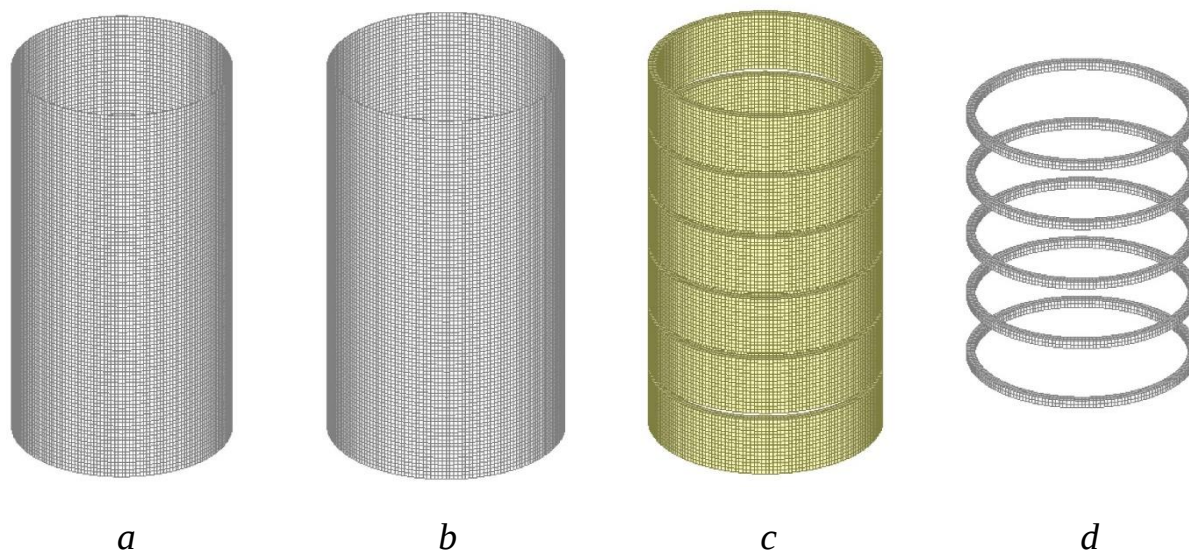


Рисунок 4. Скінченно-елементна модель тришарової циліндричної оболонки
нормального еліптичного перетину:

a – обшивка несуча внутрішня; *b* – теж саме зовнішня; *c* – полімерний заповнювач;
d – армуючі ребра

При визначенні впливу армування полімерного заповнювача на динаміку цієї структури досліджувались варіанти включаючи наявність і відсутність армування полімерного заповнювача структури металевими ребрами. При цьому співвідношення модулів пружності матеріалу несучих шарів і заповнювача складало $E_1/E_t = 500$. В обох випадках прогини і напруження в серединних поверхнях несучих шарів розраховувались в перетині S_1 в області: $D = \{0 \leq S_1 \leq L\}$.

Отримані результати (рис. 5а, 6а) показують, що нормальні прогини обох несучих шарів мають практично однакові величини, а їх максимальні значення досягаються: у першому випадку при $t=8,65T$, а в другому – при $t=8,7T$. Максимальні прогини указаних шарів при відсутності армування заповнювача практично на 35% перевищують їх величину при його наявності.

Подібний характер впливу армування показують і зміни величин нормальних напружень серединних поверхонь несучих шарів структур (рис. 5б і рис. 6б).

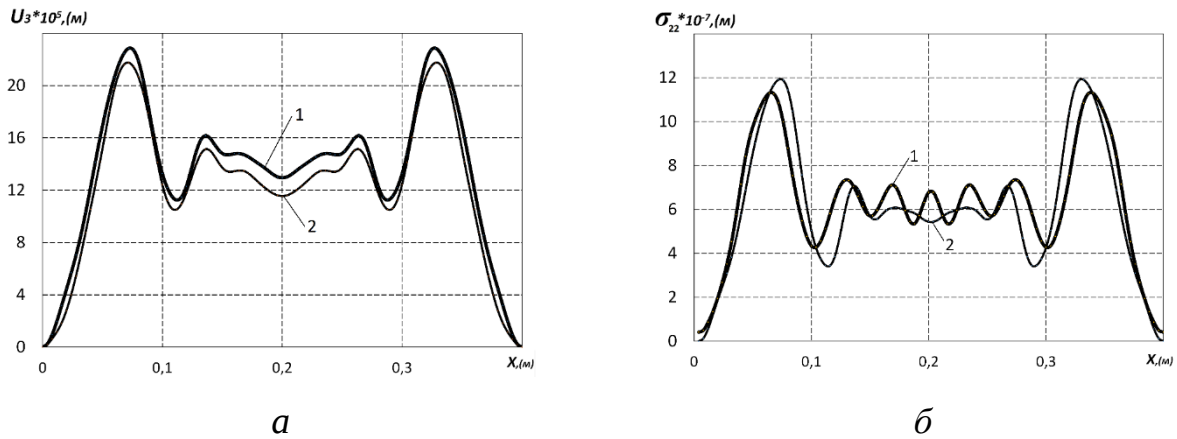


Рисунок 5. Максимальні величини нормальних прогинів (а) і напружень (б) несучих шарів
циліндричної тришарової структури без армування заповнювача (перетин S_1):
1— шар внутрішній; 2— теж саме зовнішній

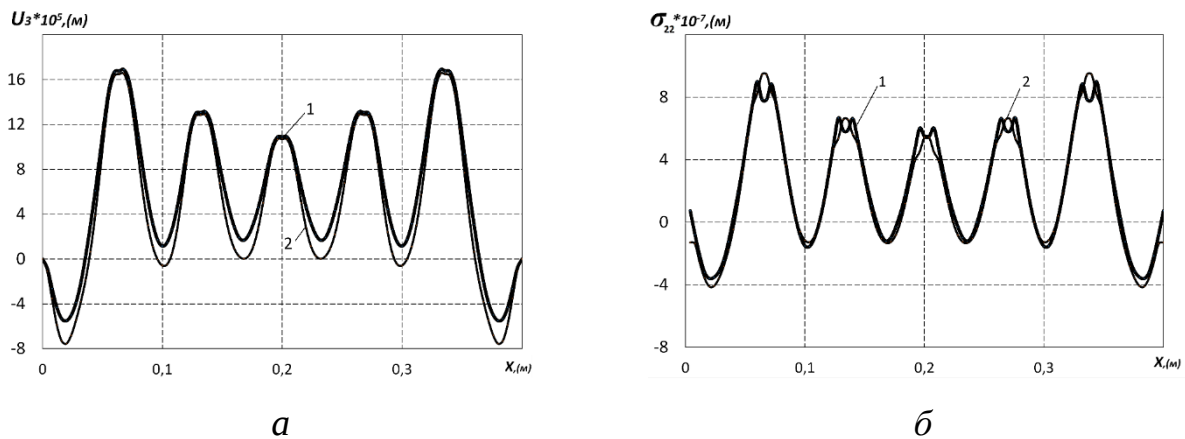


Рисунок 6. Максимальні величини нормальних прогинів (а) і напружень (б) несучих шарів
циліндричної тришарової структури з армуванням заповнювача (перетин S_1):
1— шар внутрішній; 2— теж саме зовнішній

Розглядався також і варіант таких циліндричних структур з ребрами без заповнення полімерним матеріалом. В цьому випадку значні прогини відбуваються у внутрішньому шарі структури і практично відсутні у зовнішньому. В даній роботі ці дані не наводяться.

Таким чином, судячи по отриманих результатах, армування полімерного заповнювача, значно впливає на динаміку тришарових циліндричних оболонок.

Де що по іншому досліджувався вплив цього фактора на динаміку півсферичної шаруватої структури. Її скінченно-елементна модель (рис. 7) в структурі з полімерним заповнювачем налічувала 92700 тривимірних скінченних елементів і 123604

вузли. А модель структури без заповнювача налічувала 63600 таких елементів і 123604 вузли. В обох варіантах скінченно-елементних моделей внутрішній та зовнішній несучі шари налічували 30900 елементів. Кількість елементів легкого заповнювача дорівнювала 29100, а армуючих ребер – 1800.

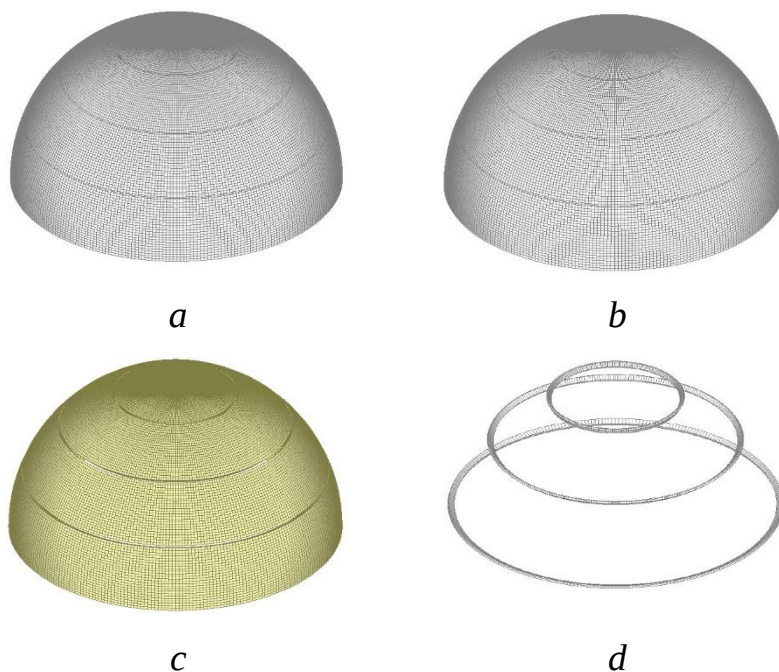


Рисунок 7. Скінченно-елементна модель тришарової півсферичної оболонки:

a – обшивка несуча внутрішня; *b* – теж саме зовнішня; *c* – полімерний заповнювач;
d – армуючі ребра

І як відмічено раніше, при створенні скінченно-елементної моделі використався об'ємний скінченний елемент типу *Solid* (рис. 8). Якість таких елементів у моделі відповідала вимогам забезпечення якості скінченно - елементної сітки програмно-розрахункового комплексу *Fimap with NX Nastran* [324].

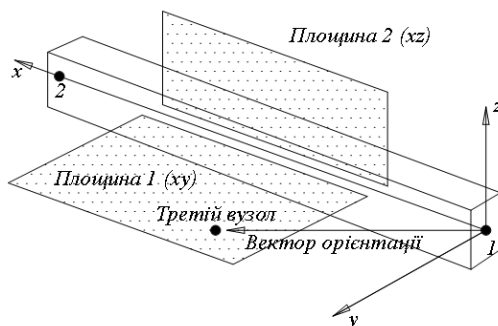


Рисунок 8. Скінченний елемент типу *Solid*

Визначені величини нормальних прогинів і нормальних напружень серединних поверхонь несучих шарів наведені на рис. 9 і 10. Як і в попередньому випадку армування структури значно вплинуло на величини прогинів і напружень цих шарів. Але на відміну від попередньої структури, прогини і

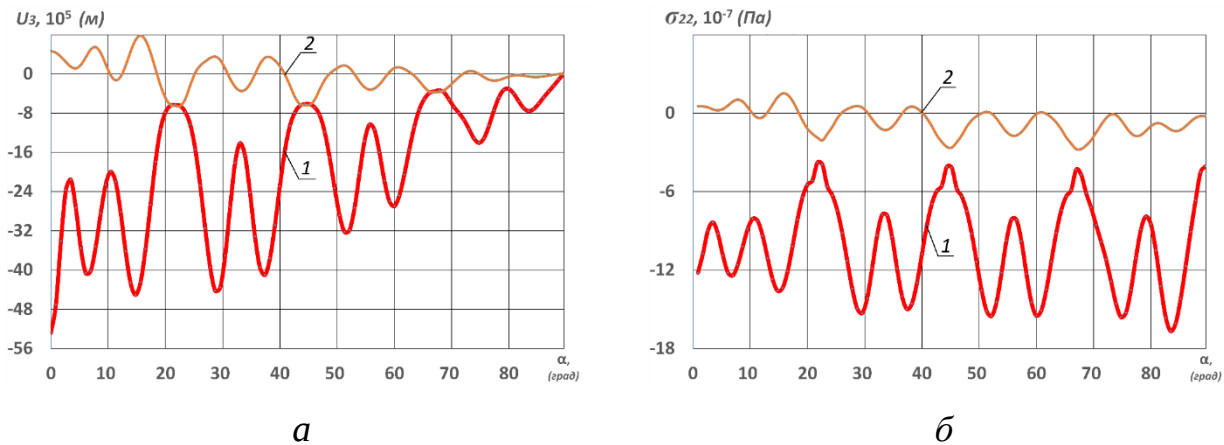


Рисунок 9. Максимальні величини нормальних прогинів (а) і напружень (б) несучих шарів півсферичної тришарової структури без полімерного заповнювача:

1– шар внутрішній; 2– теж саме зовнішній

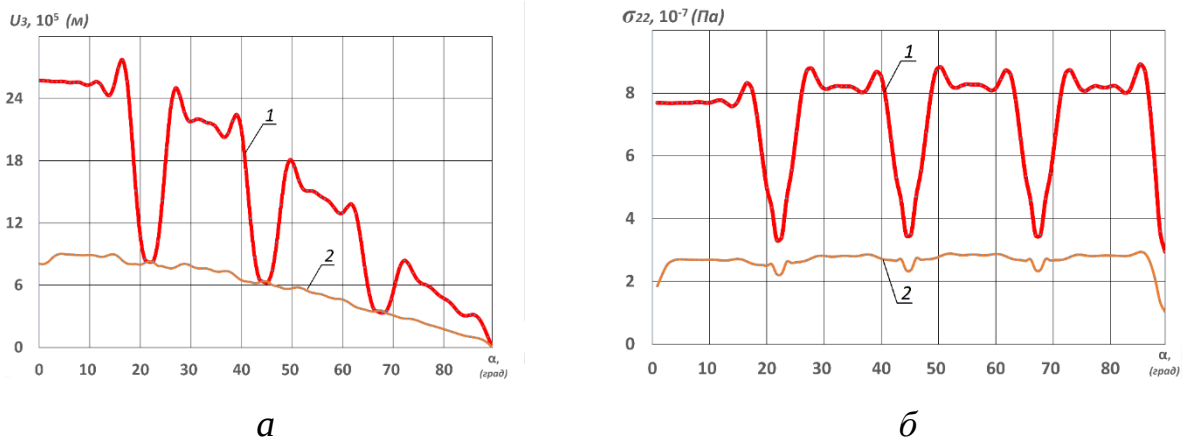


Рисунок 10. Максимальні величини нормальних прогинів (а) і напружень (б) несучих шарів півсферичної тришарової структури із армованим полімерним заповнювачем $E_1/E_t = 3,5 \cdot 10^3$:

1– шар внутрішній; 2– теж саме зовнішній

напруження обох несучих шарів півсферичної структури значно відрізняються між собою. Так максимальна величина прогину внутрішнього шару півсферичної структури без полімерного заповнювача перевищує його величину в аналогічній структурі із полімерним заповнювачем більш ніж на 100%, а прогини в її зовнішньому шарі в обох випадках виявились практично однаковими. Відрізняються також і нормальні напруження обох несучих шарів в серединних

поверхнях структури. Максимальні значення цього показника у внутрішньому шарі, при відсутності полімерного заповнювача, перевищує його величину в структурі із заповнювачем майже на 70%.

Отримані результати дозволяють констатувати, що армування полімерного заповнювача півсферичної, як і циліндричної структури, також значно впливає на її динаміку. А більш значні абсолютні величини прогинів її несучих шарів можуть бути результатом додаткового впливу на динаміку півсферичної структури її конструкційних особливостей.

Армування полімерного заповнювача тришарових оболонкових структур металевими ребрами значно впливає на їх динамічну поведінку. Ця операція збільшує жорсткість конструкції, зменшує величини нормальних прогинів. Особливо значення має врахування цього фактора для структур працюючих при нестационарних динамічних навантаженнях.