

УДК 539.3; 624.073.4

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТРИШАРОВОЇ ОБОЛОНКОВОЇ СТРУКТУРИ ЕЛІПТИЧНОГО ПЕРЕТИНУ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В.В. Гайдайчук,

д-р техн. наук

К.Е. Котенко,

канд. техн. наук

А.М. Мамедов,

канд. техн. наук

Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.147-154

Досліджена динамічна поведінка тришарової циліндричної структури нормального еліптичного перетину з дискретним полімерним заповнювачем при дії внутрішнього нестационарного навантаження. Створені скінченні-елементні моделі структури і виконані розрахунки деформацій ε_{22} і нормальних напружень σ_{22} її несучих шарів.

Розглянуто варіанти структур без полімерного заповнювача і із заповнювачем різної жорсткості, армованим ребрами. Приведено порівняльний аналіз деформацій і напружень несучих шарів при співвідношенні модулів пружності матеріалу несучих шарів і заповнювача $E_{1,2}/E_f=500$ і $E_{1,2}/E_f=50$.

В скінченно-елементних моделях застосовані скінченні елементи типу *Solid* і типу *Laminate*. Розрахунки здійснені програмно-розрахунковим комплексом NASTRAN алгоритмом прямого перехідного динамічного процесу.

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

Вступ

Конструкції шаруватих оболонок і їх елементи широко застосовуються в сучасних машинах і механізмах космічної, атомної, паливної та інших галузях техніки. Будучи важливими складовими таких конструкцій їх розрахунок потребує максимального врахування дії можливих впливів на них. Особливо важливим є врахування факторів зменшуючих стійкість оболоноквих структур до динамічних нестационарних навантажень.

Дослідження динаміки таких структур прямо чи побічно характеризуючі дану проблему [1-3] показують, що крім геометричних особливостей конструкції і параметрів фізико-механічних властивостей матеріалу, потребують врахування і особливості самих контрольованих показників, при різних властивостях матеріалів полімерного заповнювача структури. Результати врахування цього підходу приведені в наступних дослідженнях.

Постановка задачі. Напружено-деформований стан несучих шарів оболонок визначається через компоненти узагальненого векторапереміщень $\bar{U}_1 = (u_1^1, u_3^1, \varphi_1^1)^T$ і $\bar{U}_2 = (u_1^2, u_3^2, \varphi_1^2)^T$, а легкого полімерного заповнювача – $\bar{U}_t = (u_{1t}, u_{3t}, \varphi_{1t})^T$. Деформований стан армуючих ребер, спрямованих вздовж колової координати, визначається узагальненим вектором переміщень $\bar{U}_J = (u_1^j, u_3^j, \varphi_1^j)^T$.

Закон зміни переміщень оболонки за товщиною має такий вигляд:

$$u_1^z(s_1, s_2, z) = u_1(s_1, s_2) + z\varphi_1(s_1, s_2);$$

$$u_2^z(s_1, s_2, z) = u_2(s_1, s_2) + z\varphi_2(s_1, s_2);$$

$$u_3^z(s_1, s_2, z) = u_3(s_1, s_2), \quad z \in [-h/2, h/2]. \quad (1)$$

Тут $\bar{U} = (u_1, u_2, u_3, \varphi_1, \varphi_2)^T$ – компоненти узагальненого вектора переміщень серединної поверхні.

А компоненти деформації циліндричної оболонки еліптичного перерізу визначаються через компоненти узагальненого вектора переміщень за формулами [3, 4]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial s_1}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial s_2} + k_2 u_3; \quad \varepsilon_{12} = \omega_1 + \omega_2; \quad \omega_1 = \frac{\partial u_2}{\partial s_1}; \quad \omega_2 = \frac{\partial u_1}{\partial s_2}; \quad \varepsilon_{13} = \varphi_1 + \theta_1; \quad \varepsilon_{23} = \varphi_2 + \theta_2; \\ \theta_1 &= \frac{\partial u_3}{\partial s_1}; \quad \theta_2 = \frac{\partial u_3}{\partial s_2} - k_2 u_2; \quad \chi_{11} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial s_1}; \quad \chi_{22} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial s_2}; \quad \chi_{12} = \tau_1 + \tau_2 + k_1 \omega_2 + k_2 \omega_1; \\ \tau_1 &= \frac{\partial \varphi_2}{\partial s_1}; \quad \tau_2 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial s_2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Дослідження динаміки несучих шарів тришарової циліндричної оболонки еліптичного перетину (рис. 1) здійснювалось при таких її параметрах: несучі шари (внутрішні і зовнішні) структури і виготовлені із матеріалу з однаковими фізико-механічними властивостями товщиною $h_1 = h_2 = 0,001$ м. 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 $\rho_r = 25$ кг/м³. Загальна товщина стінки циліндричної структури становить $h = 0,010$ м, а інші параметри мають

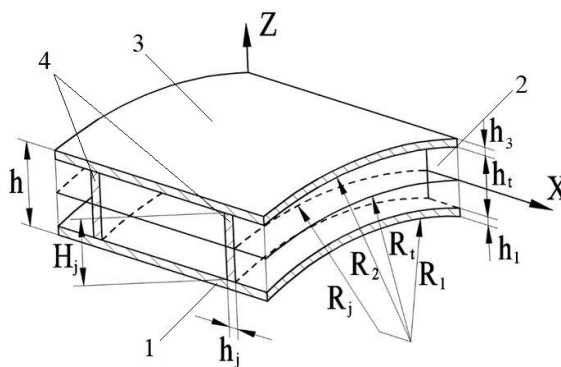


Рис. 1. Фрагмент конструкції тришарової циліндричної оболонки еліптичного перетину з полімерним заповнювачем армованим ребрами жорсткості: 1 – внутрішній шар; 2 – полімерний заповнювач; 3 – зовнішній шар; 4 – армуючі ребра

наступні значення: $L = 0,40$ м, $L/h_1 = 0,4$, $b/h_1 = 0,1$, $a/b = 1,10$, $F_j = H_j \cdot h_j = 6,4 \cdot 10^{-5}$ м², армуючі ребра структури (паралелі) знаходяться в таких її точках:

$$x_j = [16 + 17(k-1)] \Delta x, \quad k = 1, 5, \quad \Delta x = L/100,$$

де k – кількість армуючих ребер прийнята в розрахунках.

Динамічна поведінка досліджуваної структури оцінювалася величинами нормальних деформацій ε_{22} та нормальними напруженнями σ_{22} серединних поверхонь несучих шарів.

Розподіл імпульсного навантаження $P(t)$ здійснювався, згідно приведеному на рис. 2 і мав часовий інтервал $0 \leq t \leq 10T$:

$$P(t) = A \cdot \sin \frac{\pi t}{T} [\eta(t) - \eta(t-T)], \quad (3)$$

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.

Покладається, що краї оболонок жорстко затиснені: $U_1 = U_2 = U_3 = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$.

Застосовувався скінченно-елементний метод розрахунків нормальних деформацій ε_{22} і нормальних напружень σ_{22} [5]. А самі розрахунки виконувались програмно-

розрахунковим комплексом Fimap with NX Nastran алгоритмом прямого перехідного динамічного процесу по аналогії з розрахунками інших тришарових структур [6-8].

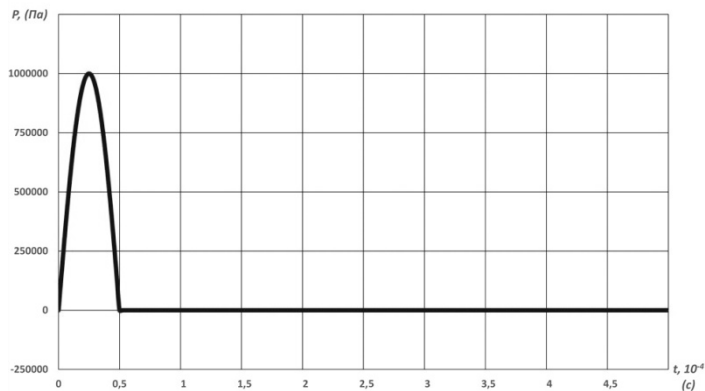


Рис. 2. Розподіл імпульсного навантаження $P(t)$

В загальній постановці скінченно-елементним метод передбачає визначення області і вектора переміщень пружної системи характеризуючогося мінімізацією її потенціальної енергії, а після її визначення – розраховуються тензори переміщень і напружень даної системи [5]. І якщо повна потенціальна енергія системи має вид:

$$\Pi = E - W, \quad (4)$$

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

$$\Pi = \sum_{e=1}^E (E^{(e)} - W^{(e)}) = \sum_{e=1}^E \pi^{(e)}. \quad (5)$$

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

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (6)$$

відповідають співвідношенням:

$$[K] = \sum_{e=1}^E [k^{(e)}], \quad \{F\} = -\sum_{e=1}^E \{f^{(e)}\}. \quad (7)$$

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

Цей метод хоч і є досить універсальним і ефективним, але його використання потребує значних професійних навичок, а в окремих випадках навіть інтуїтивного відчуття ситуації. Для визначення величин деформацій і напружень були створені скінченно-елементні моделі структури без заповнювача і з дискретно-симетричним легким, армованим ребрами заповнювачем (рис. 3). Складові першої моделі: (а) – обшивка несуча внутрішня; (б) – обшивка несуча зовнішня; (с) – легкий заповнювач; (д) – армуючі ребра.

При створенні першої моделі застосовувався тривимірний об'ємний скінченний елемент типу Solid. Ця модель у варіанті тришарової циліндричної структури без полімерного заповнювача налічувала у внутрішній несучій оболонці 40000 елементів, зовнішній – 40000, а в армуючих ребрах – 4000. Кількість скінченних елементів легкого заповнювача (пінопласту) дорівнювала 36000. Загальна кількість скінченних елементів у моделі без пінопласту складала 84000 елементів і 124200 вузлів. А при наявності пінопласту такі дані дорівнюють: 120000 елементів і 141400 вузлів.

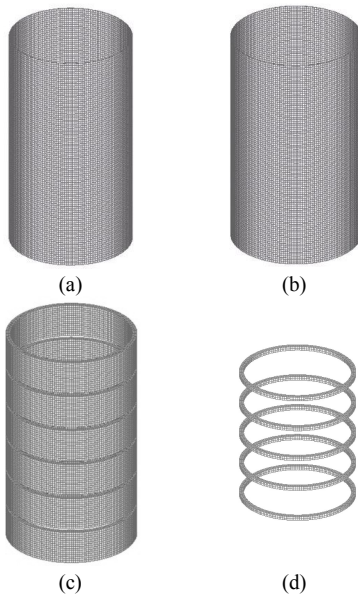


Рис. 3. Скінченно-елементна модель тришарової циліндричної оболонки нормального еліптичного перетину із скінченним елементом Solid

Для перевірки збіжності результатів розрахунку була також створена друга скінченно-елементна модель з використанням скінченного елемента типу Laminate. Ця модель налічувала 20000 скінченних елементів і 20200 вузлів.

Типи скінченних елементів по співвідношенню довжини ребер елементів «Aspect Ratio», звуженню «Taper», викривленню «Warping», внутрішнім кутам «Internal Angles» та іншим показникам відповідали вимогам забезпечення якості скінченно-елементної сітки комплексу NASTRAN [9].

В обох моделях деформації і напруження в серединних поверхнях несучих шарів розраховувались в перетині S_1 в області: $D = \{0 \leq S_1 \leq L\}$.

Для визначення часового кроку перехідного динамічного процесу був проведений додатковий розрахунок власних коливань і визначено період коливань оболонкової структури. Період коливань склав не менш 10 часових кроків, а повний час розрахунку майже як у 14 разів його перевищив [9].

Результати дослідження і їх аналіз. Розглянуто три випадки динамічного деформування тришарової циліндричної оболонкової структури еліптичного перетину при: 1) відсутності полімерного заповнювача; 2) співвідношенні модулів пружності несучих шарів і заповнювача $E_{1,2}/E_t = 500$; 3) теж саме $E_{1,2}/E_t = 50$. Визначались максимальні величини і розподіл деформацій ε_{22} серединних поверхонь несучих шарів і нормальні напруження σ_{22} .

В першому випадку максимальні деформації і нормальні напруження найбільш значно проявились у внутрішньому шарі структури (крива 1, рис. 4 (а), (б)). Їх максимальні значення майже на 10% перевищили їх величини в центральній частині довжини структури.

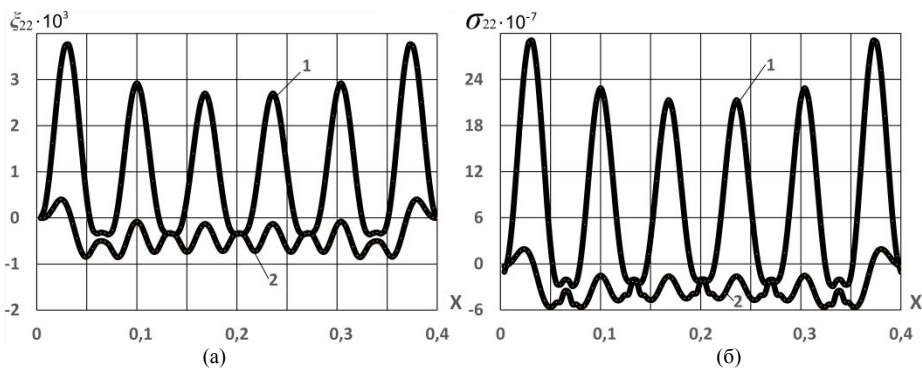


Рис. 4. Максимальні величини деформацій ε_{22} (а) і нормальних напружень σ_{22} (б) при $t=7,95T$ за відсутності полімерного заповнювача

У **другому випадку**, при співвідношенні модулів пружності $E_{1,2}/E_t = 500$ деформаціях несучих шарів ε_{22}^1 , ε_{22}^2 (рис. 5 (а), відповідно крива 1 та крива 2) виявились практично однаковими, а їх величина в порівнянні з величиною деформацій внутрішнього шару, зафіксованою в першому випадку, суттєво зменшилась (60%). Аналогічний характер має і зміна нормальних напружень σ_{22}^1 , σ_{22}^2 (рис. 5 (б), відповідно крива 1 та крива 2).

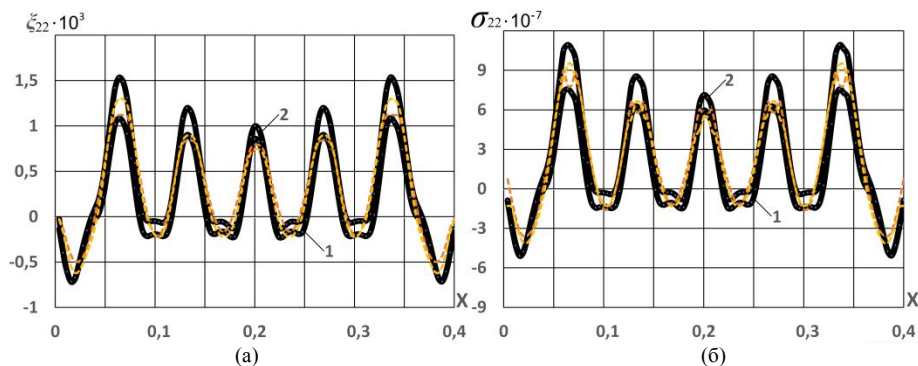


Рис. 5. Максимальні величини деформацій ε_{22} (а) і нормальних напружень σ_{22} (б) при $t=8,7T$ при співвідношенні модулів пружності $E_{1,2}/E_t = 500$

Максимальні величини нормальних напружень в цьому випадку також поступаються наведеним в першому випадку величинам. Для перевірки збіжності отриманих величин деформацій і напружень в цьому випадку динамічного деформування структури було проведено порівняння результатів розрахунку з використанням скінченних елементів типу Solid (рис. 5 (а), (б) штрихові лінії) та типу Laminate (рис. 5 (а), (б) суцільні лінії).

В **третьому випадку**, при збільшенні модуля пружності полімерного заповнювача $E_{1,2}/E_t = 50$ максимальні величини деформацій ε_{22}^1 , ε_{22}^2 (рис. 6 (а), відповідно крива 1 та крива 2) і напружень σ_{22}^1 , σ_{22}^2 (рис. 6 (б), відповідно крива 1 та крива 2) в несучих мають практично однакові значення. А їх розподіл вздовж координати X відрізняється від аналогічного розподілу приведених в перших двох випадках. Максимальні значення деформацій ε_{22}^1 , ε_{22}^2 і напружень σ_{22}^1 , σ_{22}^2 спостерігається приблизно при 0,1 м та 0,3 м. А по відношенню до другого випадку величини деформації і напружень майже не змінились.

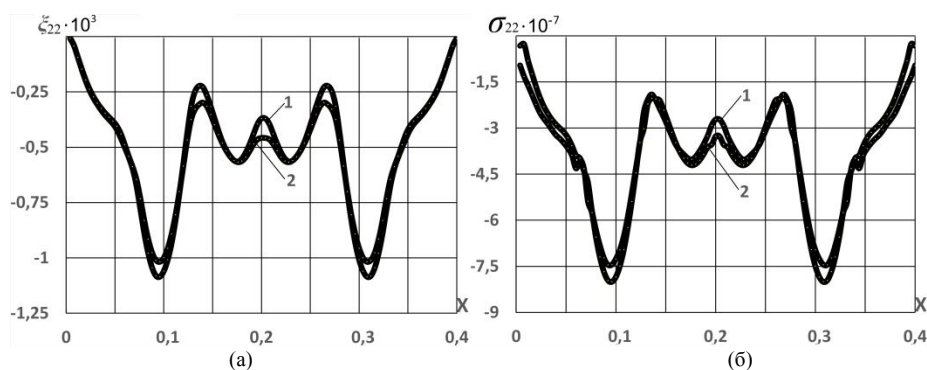


Рис. 6. Максимальні величини деформацій ε_{22} (а) і нормальних напружень σ_{22} (б) при $t=4,7T$ при співвідношенні модулів пружності $E_{1,2}/E_t = 50$

Отже, полімерний заповнювач і пружність його матеріалу впливає на напружено-деформований стан досліджуваної структури, суттєво підвищує її стійкість до впливу динамічного навантаження.

Висновки

Аналіз графіків залежності максимальних деформацій та напружень у серединних поверхняхнесучих шарів тришаровихциліндричних оболонкових структур еліптичного перетину показує, щопараметри механічних характеристик легкого полімерного заповнювача значно впливають на стійкість таких структур до динамічних впливів.

Таким чином, можна стверджувати, що підбором відповідних конструкційних елементів таких тришарових структур можна створити конструкцію з прогнозованою динамічною поведінкою при нестационарному навантаженні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Луговой П.З. Динаміка конструктивно-неоднорідних оболонкових структур: монографія/П.З. Луговой, В.Ф.Мейш, Ю.А. Мейш/ – К.:Ліра-К, 2022. – 336 с.
2. Lugovoi P. Z., Gaidaichuk 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.
3. Головки 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.
4. Meish V.F., Meish Yu.A., Pavlyuk A.V. Dynamics of a Three-Layer Elliptic Cylindrical Shell Reinforced with Discrete Rings // Int. Appl. Mech. – 2018. – 54, N 2. – P. 172 – 179.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.- 392 с.
6. Lugovoi P. Z., Gaidaichuk V.V., Orlenko S.P., Kotenko K.E. Dynamics of Sandwich Conical Shells with a Discretely Inhomogeneous Core Under Nonstationary Loading. "International Applied Mechanics", 2022, 58(4), p. 410–422.
7. Gaidaichuk V.V., Kotenko K.E., Snizhko N.A. Impact of engineering/technology factors and nonstationary loads on the stress - strain state of a three-layer cylindrical shell. – 2021. – Issue. 107. – P. – 281-287.
8. Gaidaichuk 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 / Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2022. – Issue 109. – P. 467-472.
9. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 784 с.

REFERENCES

1. Lugovoi P.Z. DYNAMIKA KONSTRUKTYVNO-NEODNORIDNYH OBOLONKOVYIH STRUKTUR: MONOGRAFIYA (Dynamics of structurally inhomogenous shell structures: monograph) / P.Z. Lugovoi, V. FMeish, Y. aMeish/ – K.:Lira-K, 2022. – 336 p.
2. Lugovoi P. Z., Gaidaichuk 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.
3. Golovko K. G., Lugovoi P. Z. &Meish V. F. Dynamics of inhomogeneous shells under nonstationary loads. Kyiv. Publ. Centre “Kyiv University”, 2012 – 541 p.
4. Meish V.F., MeishYu.A., Pavlyuk A.V. Dynamics of a Three-Layer Elliptic Cylindrical Shell Reinforced with Discrete Rings // Int. Appl. Mech. – 2018. – 54, N 2. – P. 172 – 179.
5. Segerlind L. Primenenie metoda konechnyih elementov (Application of the finite element method). M.: Mir, 1979- 392 p.
6. Lugovoi P. Z., Gaidaichuk V.V., OrlenkoS.P., Kotenko K.E. Dynamics of Sandwich Conical Shells with a Discretely Inhomogeneous Core Under Nonstationary Loading. -"International Applied Mechanics", 2022, 58(4), P. 410–422.
7. Gaidaichuk V.V., Kotenko K.E., Snizhko N.A. Impact of engineering/technology factors and nonstationary loads on the stress - strain state of a three-layer cylindrical shell. – 2021. – Issue. 107. – P. – 281-287.
8. Gaidaichuk 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 / Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2022. – Issue 109. – P. 467-472.
9. Rychkov S. P. Modelirovanie konstruksiy v srede Femap with NX Nastran (Structural modeling in Femap with NX Nastran).-M.: DMK Press, 2016.-784 p.

Гайдайчук В.В., Котенко К.Е., Мамедов А.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТРИШАРОВОЇ ОБОЛОНКОВОЇ СТРУКТУРИ ЕЛІПТИЧНОГО ПЕРЕТИНУ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Досліджена динамічна поведінка тришарової циліндричної структури нормального еліптичного перетину з дискретним полімерним заповнювачем при дії внутрішнього нестационарного навантаження. Створені скінченні-елементні моделі структури і виконані розрахунки деформацій ε_{22} і нормальних напружень σ_{22} її несучих шарів.

Розглянуто варіанти структур без полімерного заповнювача і із заповнювачем різної жорсткості, армованим ребрами. Приведено порівняльний аналіз деформацій і напружень несучих шарів при співвідношенні модулів пружності матеріалу несучих шарів і заповнювача $E_{1,2}/E_f=500$ і $E_{1,2}/E_f=50$.

В скінченно-елементних моделях застосовані скінченні елементи типу *Solid* і типу *Laminate*. Розрахунки здійснені програмно-розрахунковим комплексом NASTRAN алгоритмом прямого перехідного динамічного процесу.

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

Gaidaichuk V.V., Kotenko K.E., Mamedov A.M.

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF A THREE-LAYER SHELL STRUCTURE OF AN ELLIPTICAL CROSS-SECTION UNDER NON-STATIONARY DYNAMIC LOADING

The dynamic behavior of a three-layer cylindrical structure of normal elliptical cross-section with a discrete polymer filler under the action of an internal non-stationary load was studied. Finite element models of the structure were created and deformations and normal stresses of its bearing layers were calculated. Variants of structures without polymer aggregate and with aggregate of different stiffness, reinforced with ribs, were considered. A comparative analysis of the deformations and stresses of the bearing layers at the ratio of the modulus of elasticity of the material of the bearing layers and the aggregate $E_{1,2}/E_f=500$ and $E_{1,2}/E_f=50$ is given. Finite elements of the Solid and Laminate types are used in the finite-element models. The calculations were carried out by the software and calculation complex Nastran using the direct transient dynamic process algorithm.

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

УДК 539.3

Гайдайчук В.В., Котенко К.Е., Мамедов А.М. Дослідження динаміки тришарової оболонкової структури еліптичного перетину при нестационарному динамічному навантаженні// Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 111. – С. 147-154.

Іл. 6. Бібліогр. 9 назв.

UDC 539.3

Gaidaichuk V.V., Kotenko K.E., Mamedov A.M. Investigation of the dynamics of a three-layer shell structure of an elliptical cross-section under non-stationary dynamic loading// Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2023. – Issue 111. – P. 147-154.

Fig. 6. Ref. 9.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури ГАЙДАЙЧУК Віктор Васильович.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31, к. 433, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра теоретичної механіки, ГАЙДАЙЧУКУ Віктору Васильовичу.

Роб. тел. +380 (44) 241-55-72

Моб. тел. +380 (97) 542-94-27

e-mail: viktor_gaydaychuk@bigmir.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2059-7433>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури КОТЕНКО Костянтин Едуардович.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31, к. 433, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра теоретичної механіки, КОТЕНКУ Костянтину Едуардовичу.

Роб. тел. +380 (44) 241-55-72

Моб. тел. +380 (95) 585-20-76

E-mail: 1969box@mail.ru

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3181-3819>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, декан факультету урбаністики та просторового планування, Київський національний університет будівництва і архітектури; МАМЕДОВ Алірза Махмудович

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31, к. 430, Київський національний університет будівництва і архітектури, деканат факультету урбаністики та просторового планування, МАМЕДОВУ А. М.

Роб. тел. +380 (44) 248-30-32; +380 (44) 241-55-11

Моб. тел. +380 (67)107-8956

E-mail: mamedov.am@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4703-2694>