

УДК 539.3

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ НА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИШАРОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

К.Е. Котенко¹,
канд. техн. наук

М.О. Клименко¹,
канд. техн. наук

С.П. Орленко²,
канд. техн. наук

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03680

²Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України,
вул. Нестерова, 3, Україна, м. Київ, 03057

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.183-192

Проведено теоретичне дослідження спектра власних частот тришарової циліндричної оболонки з дискретно-симетричним легким, ребристим заповнювачем за наявності кільцевих тріщин. Методом скінченних елементів вирішується актуальна задача визначення власних частот тришарового елемента спеціальної техніки за різних граничних умов. Аналіз отриманих чисельних результатів дав змогу визначити характер впливу тріщин різної довжини на частотні спектри тришарових циліндричних оболонок з неоднорідним заповнювачем.

Наведені частотні спектри для різних видів граничних умов. Аналіз отриманих теоретичних результатів вказує на те, що тріщини малих розмірів мало впливають на власну частоту конструкції. При виникненні відносно великих тріщин спостерігається значна зміна частотного спектру практично нової тришарової конструкції.

Ключові слова: спектр власних частот, тришарова циліндрична оболонка, неоднорідний заповнювач, колова тріщина, граничні умови, скінченно-елементний метод, вплив тріщин.

Вступ. Циліндричні оболонки з різними технічними особливостями широко застосовуються в авіа-, ракето-, суднобудуванні і багатьох інших галузях техніки і будівництва. Тому розвитку теорії і методів розрахунку динаміки і статyki таких циліндричних елементів конструкцій приділяється велика увага.

Вимоги щодо міцності і ваги, що ставляться до сучасних конструкцій, постійно підвищуються, а умови їх експлуатації стають все більш жорсткими. Необхідність одночасного виконання цілого ряду інколи суперечливих вимог призводить до ідеї розробки багатошарових конструкцій, в яких кожен шар виконує тільки одну або краще кілька функцій. При цьому шари можуть відрізнятися як за товщиною, так і за фізико-механічними властивостями, тобто пакет може бути істотно неоднорідним. Останнім часом створення нових конструкцій повторного використання часто призводить до необхідності розробки тришарових оболонкових елементів із заповнювачем ускладненої геометрично-механічної структури. В результаті використання легкого заповнювача утворюється спеціальна тришарова структура з досить великою жорсткістю на згин при вигідному співвідношенні міцності і ваги. Так в роботі [2] на основі скінченно-елементної моделі досліджується вплив характеру зміни армування матеріалу тришарової конструкції перехідного відсіку космічного літального апарату на напружено-деформований стан і несучу здатність з метою забезпечення міцності відсіку. В статтях [12, 14, 19] досліджуються власні частоти і коливання сильно неоднорідних оболонок обертання. В статті [1] на основі використання скінченно-елементної моделі пропонуються нові підходи для дослідження міцності силових елементів конструкцій космічних літальних апаратів (КЛА), зокрема тришарової конструкції перехідного відсіку. В роботах [5, 7, 11] досліджено вплив дії розподілених і локальних імпульсних навантажень на тришарові циліндричні оболонкові елементи корпусів ракет. Проведено скінченно-елементне моделювання динаміки перехідних процесів тришарових циліндричних елементів з дискретно-

симетричним легким армованим ребрами заповнювачем, що дає можливість правильно вибрати фізико-механічні параметри циліндричних корпусів конструкцій.

При дослідженні міцності та стійкості таких оболонкових конструкцій велика увага приділяється експериментальним методам [3]. Так в роботі [4] наведені експериментальні результати досліджень деформування та міцності конструкції міжступеневого відсіку ракетносія при комбінованому статичному навантаженні. Результати експерименту добре узгоджуються з теоретичними розрахунками методом скінчених елементів. В статті [11] описано багатофункціональну інформаційно-вимірювальну систему PMX-TEST для стендів і установок при проведенні випробувань міцності моделей та елементів конструкцій з композиційних матеріалів. Система забезпечує багатоканальне вимірювання деформації, тиску і температури. Розроблено відповідне програмне забезпечення PMX-TEST-Monitor, яке дозволяє відображати в цифровому і графічному вигляді експериментальні дані, здійснювати їх накопичення і збереження для подальшої обробки. В дослідженні [4] визначення напружено-деформованого стану паливного баку проводилось експериментальними і числовими методами з використанням методу скінчених елементів. Визначені величини руйнуючих напружень і розташування зон руйнування паливного баку при дії комбінованого внутрішнього навантаження. Порівняльний аналіз теоретичних і експериментальних результатів підтвердив працездатність нової експериментальної методики, що дозволяє, при проектуванні нових конструкцій, зменшити кількість дорогих експериментальних досліджень і замінити їх комп'ютерним моделюванням. В роботі [21] наведені загальні міркування по розробці нормативної бази залишкового ресурсу будівельних конструкцій і елементів космічної техніки, визначено основні методичні етапи обґрунтування їх ресурсів. При розробці норм міцності та основ розрахунку ресурсу доцільно використовувати сучасні методи технічної діагностики, зокрема методи голографічної інтерферометрії та акустичної емісії, швидкозбіжні схеми методів чисельних операційних розрахунків. В статті [13] побудована математична модель динамічного стану композитного обтічника при відділенні його від ракети, яка дозволяє моделювати розшарування структури склопластикового корпусу для оцінки перерозподілу напружено-деформованого стану. Змодельовані розшарування різного вигляду як нерегулярних зон композитного корпусу, так і у випадку виходу його на межу композитного елемента. В роботі [16] досліджені контактні напруження в шаруватих структурах. Чисельно досліджено напружено-деформований стан двошарового балона під дією внутрішнього тиску з локальним дефектом в його циліндричній частині. Багато робіт присвячено дослідженню впливу недосконалості циліндричних оболонок на розподіл їх динамічних характеристик [7, 8 - 10]. В дослідженнях [22, 23, 26] визначено вплив підкріплень циліндричних оболонок на характер їх власних коливань. В статті [18] експериментальним шляхом досліджені вільні коливання циліндричної оболонки, що містить окружну поверхневу тріщину. Результати свідчать, що мінімальний вплив відбувається під кутом тріщини 75° , а кругова тріщина має більший ефект, ніж поздовжня тріщина. Крім того, при жорстко защемлених і вільних граничних умовах оболонок їх власна частота зменшується, якщо тріщина розташована в середині оболонки. В дослідженні [20], для визначення власних частот ізотропних круглих циліндричних оболонок постійної та змінної товщини та еквівалентної маси використовується метод голографічної інтерферометрії. В роботі [25] використано цифрову голографічну віброметрію для виявлення дефектів і значного підвищення інтенсивності коливань і зниження вхідної акустичної потужності до рівнів, допустимих для безконтактного неруйнівного контролю.

З наведеного літературного огляду слідує, що існує достатня теоретична і експериментальна інформація для визначення впливу дефектів різного роду на динамічні характеристики конструктивних елементів спеціальної техніки. Але у відкритій літературі практично відсутні теоретичні роботи по дослідженню впливу тріщин на динамічні характеристики тришарових циліндричних оболонкових елементів з неоднорідним заповнювачем. Тоді як при їх конструюванні необхідно володіти теоретичною і експериментальною інформацією про розподіл їх динамічних характеристик, зокрема, про розподіл частот та форм власних коливань.

При багаторазовому використанні оболонкових конструкцій з'являються конкретні проблеми теоретичних досліджень впливу появи конструктивних тріщин різного типу на

динамічні характеристики тришарових циліндричних елементів з неоднорідним заповнювачем за різних граничних умов.

Постановка задачі. Виснаємо дослідження власних частот відповідального елементу у вигляді тришарової циліндричної оболонки симетричної структури з дискретно-симетричним легким, армованим ребрами заповнювачем. Для цього використаємо рівняння руху такого елементу, яке наведено в статті [24]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{11}^i}{\partial x} - \frac{1}{R_i} N_{13}^i &= \left(\rho_i h_i + \frac{\rho_t h_t}{3} \right) \frac{\partial^2 u_1^i}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial T_{13}^i}{\partial x} - \frac{T_{11}^i}{R_{1i}} - \frac{1}{R_{1i} h_i} M_{11}^i + \frac{1}{h_i} \frac{\partial M_{13}^i}{\partial x} &= \rho_i h_i \frac{\partial^2 u_{03}^i}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial M_{11}^i}{\partial x} - T_{13}^i - N_{13}^i &= \rho_i \frac{h_i^3}{12} \frac{\partial^2 \varphi_1^i}{\partial t^2}, \quad i = 1, 2; \\ \frac{\partial T_{11}^t}{\partial x} - \frac{1}{R_t} T_{13}^t &= \rho_t h_t \frac{\partial^2 u_0^t}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial T_{13}^t}{\partial x} = \rho_t h_t \frac{\partial^2 w_0^t}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial M_{11}^t}{\partial x} - T_{13}^t = \rho_t \frac{h_t^3}{12} \frac{\partial^2 u_1^t}{\partial t^2}, \\ [T_{11}^{i\pm}]_j &= \rho_j F_j \frac{\partial^2 u_{1j}}{\partial t^2}; [T_{13}^{i\pm}]_j = \rho_j F_j \frac{\partial^2 u_{3j}}{\partial t^2}, \\ [M_{11}^{i\pm} \mp h_j T_{11}^{i\pm}]_j &= \rho_j I_{krj} \frac{\partial^2 \varphi_{1j}}{\partial t^2}, \quad i = 1, 2, \quad j = \overline{1, J}. \end{aligned} \quad (1)$$

Ці системи рівнянь утворюються за рахунок врахування розривних коефіцієнтів «несучі шари оболонки - армуючі ребра». На лініях розривів в рівняннях коливань (1) величини $[T_{11}^{i\pm}]_j$; $[T_{13}^{i\pm}]_j$; $[M_{11}^{i\pm}]_j$ відповідають зусиллям і моментам, які діють на j -й дискретний елемент з боку несучих оболонок. При виведенні цих рівнянь використана модель, яка передбачає ідеальне сполучення між заповнювачем і несучими оболонками без відриву і проковзування.

Властивості матеріалів суміжних шарів достатньо різні, тому для розрахунків власних частот таких оболонкових структур доцільно застосовувати метод скінченних елементів. При запуску і польоті такі конструктивні елементи піддаються нестационарним навантаженням, що може призвести до появи в них залишкових механічних дефектів різного роду (тріщини, залишкові деформації та ін.). Такі явища значно впливають на власну частоту конструкції.

Проведемо дослідження впливу появи тріщин різного масштабу в шаруватому циліндричному елементі конструкції на його власні частоти за різних граничних умов.

Розглянемо тришарову циліндричну оболонку симетричної структури з дискретно-симетричним легким, армованим ребрами заповнювачем з наступними параметрами: $L/h_1 = 40$; $h_1 = h_2 = 0,01$ м; $R_1/h_1 = 10$; $H_j/h_1 = 2$; $F_j = 2 \cdot 10^{-4}$ м²; $E_1^1 = E_1^2 = E_j = 7 \cdot 10^{10}$ Па; $\nu_1^1 = \nu_1^2 = \nu_j = 0,3$; $\rho_1 = \rho_2 = \rho_j = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, де L - довжина оболонки, h_i - товщини несучих шарів, R - радіус оболонки, H_j - товщина легкого заповнювача (пінопласт), F_j - площа поперечного перетину армуючого ребра, E - модулі пружності, ν - коефіцієнти Пуассона, ρ - густина. Модуль пружності пінопласту $E^t = 1,4 \cdot 10^9$ Па, густина $\rho_t = 25$ кг/м³, коефіцієнт Пуассона $\nu_t = 0,27$.

Наведені дані тришарового циліндричного елементу відповідають алюмінієвому сплаву АМГ6.

Відповідна задача визначення власних частот тришарового елементу розв'язується за допомогою скінченно-елементного методу. Створена адекватна рівнянню (1) скінченно-елементна модель тришарової циліндричної оболонки (рис. 1) складається із: зовнішнього несучого шару (а); внутрішнього несучого шару (б); армуючих ребер (в) і легкого заповнювача (г).

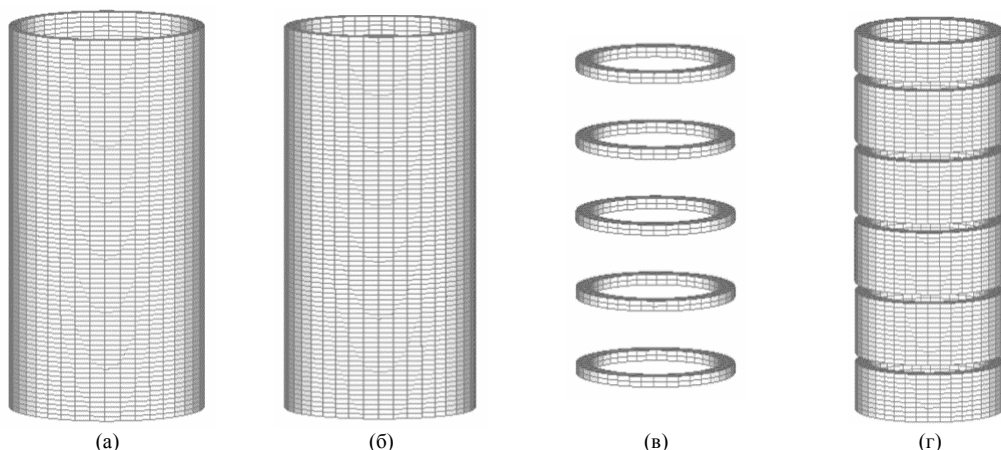
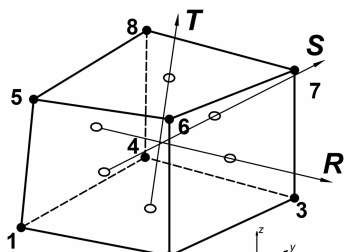


Рис. 1. Скінченно-елементна модель тришарової циліндричної оболонки:

(а) – обшивка несуча внутрішня; (б) – теж саме, зовнішня; (в) – армуючі ребра; (г) – полімерний заповнювач

В скінченно-елементній моделі тришарової оболонки використано тривимірний скінченний елемент суцільного середовища типу *Solid*, у формі восьмикутового гексаедра (рис. 2), який по критеріям геометричної форми звуження і викривлення, відповідав вимогам забезпечення якості розрахункової сітки на скінченно-елементному рівні.

Рис. 2. Просторовий скінченний елемент суцільного середовища типу *Solid*

У варіанті циліндричної структури без полімерного заповнювача кількість скінченних елементів складала у зовнішній несучій оболонці 9600 елементів, внутрішній – 9600, а в армуючих ребрах – 1200. Кількість скінченних елементів легкого заповнювача (пінопласту) дорівнювала 8400. Загальна кількість скінченних елементів у моделі без пінопласту складала 20400 елементів і налічувала 27120 вузлів. А при наявності полімерного заповнювача такі дані дорівнюють: 28800 елементів і 32400 вузлів. При відповідній

розбивці моделі забезпечується якість скінченних елементів [17].

При дослідженні циліндричних тришарових оболонок розглядалися два типи дефектів – наскрізних колових тріщин в армуючих ребрах структур і три випадки їх розташування. На

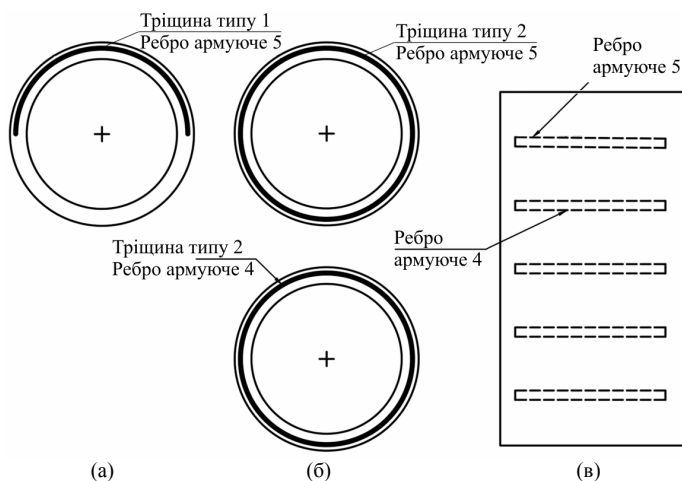


Рис. 3. Типи колових тріщин і місця їх розташування в тришарових оболонках: (а) – тріщина типу 1; (б) – тріщина типу 2; (в) – структурні армуючі ребра

рис. 3 показано дефекти оболонок структур у вигляді тріщин і місця їх розташування. В першому випадку розглядалась структура із тріщиною типу 1, довжиною $L = \pi R$, яка розташовувалась в армуючому ребрі 5 (рис. 3, а), в другому – тріщиною типу 2, яка також знаходилась в армуючому ребрі 5, але її довжина становила $L = 2\pi R$. А в третьому випадку розглядалась структура з тріщинами типу 2, які були одночасно розташовувані в ребрах 4 та 5 (рис. 3, б). В усіх трьох випадках дефектів досліджува-

лися циліндричні структури при відсутності і наявності полімерного заповнювача (пінопласту) та при різних крайових умовах закріплення оболонкових торців.

Числові результати. Нижче наведені результати розрахунків величин власних частот (табл. 1 – табл. 4) при різних закріпленнях торців оболонок. Для характерних випадків жорсткого затиснення без пінопласту (рис. 4) і шарнірного закріплення при наявності пінопласту (рис. 5) додатково наведені форми власних коливань при відповідних частотах.

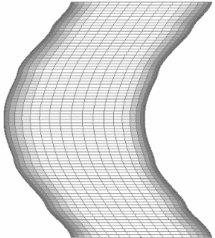
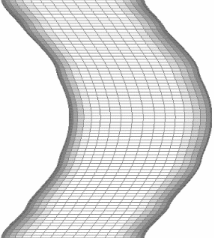
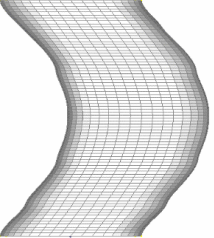
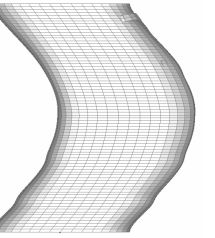
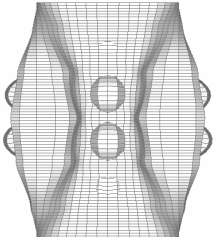
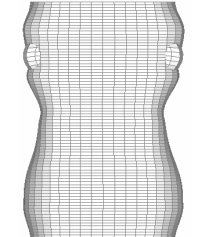
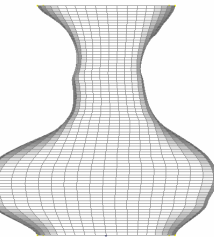
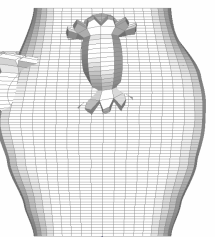
f_1	2814.572 Гц	2791.154 Гц	2768.150 Гц	2739.683 Гц
				
f_{10}	8485.337 Гц	7777.676 Гц	7283.055 Гц	6194.944 Гц
				

Рис. 4. Власні частоти і форми власних коливань при жорсткому закріпленні торців структури без полімерного заповнювача

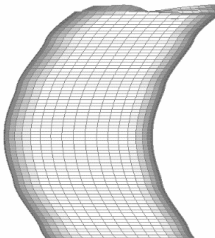
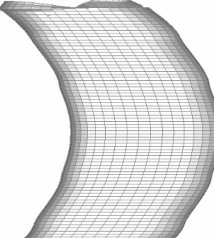
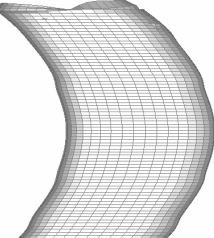
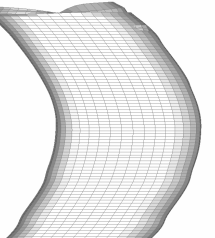
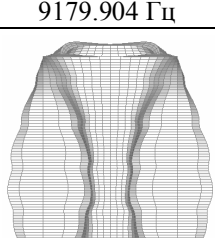
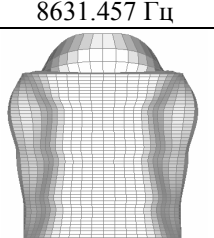
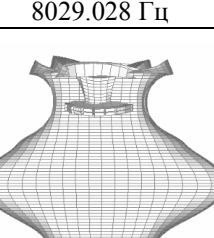
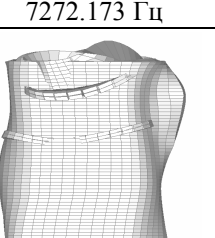
f_1	2746.031 Гц	2726.267 Гц	2705.855 Гц	2680.459 Гц
				
f_{10}	9179.904 Гц	8631.457 Гц	8029.028 Гц	7272.173 Гц
				

Рис. 5. Власні частоти і форми власних коливань при шарнірному закріпленні торців структури із полімерним заповнювачем

Аналіз власних частот для випадку жорсткого затиснення торців тришарового циліндричного елемента без пінопласту (табл. 1) показує, що для першої власної частоти f_1

циліндричної структури в першому випадку дефектів спостерігалось зменшення величина частоти на 0,83%, в другому – на 1,65% і в третьому – на 2,66% по відношенню до бездефектного стану структури. Для десятої частоти f_{10} ці зміни мали наступні значення: 8,33%; 14,17%; 26,99%. При наявності пінопласту і аналогічному закріпленні торців відсоткове зменшення першої власної частоти f_1 мало наступні значення (табл. 2): 0,62%; 1,22%; 2,05%. А десятої частоти f_{10} – 2,66%; 4,38%; 12,45%.

Таблиця 1

Величини власних частот при жорсткому закріпленні торців оболонки і відсутності заповнювача

№	Відсутність дефектів	Випадки розташування кругових тріщин		
		1	2	3
f_1	2814.572	2791.154	2768.150	2739.683
f_2	4462.475	4412.769	4359.491	3436.575
f_3	5451.159	5410.226	5374.010	3695.302
f_4	6351.847	6044.546	5697.950	4197.750
f_5	6661.090	6198.079	5820.782	4440.893
f_6	6994.696	6520.309	6139.218	4585.354
f_7	7722.276	7024.145	6317.024	4996.184
f_8	8251.526	7140.611	6549.442	5220.456
f_9	8468.695	7573.341	7081.865	5729.307
f_{10}	8485.337	7777.676	7283.055	6194.944

Таблиця 2

Величини власних частот при жорсткому закріпленні торців оболонки і наявності заповнювача

№	Відсутність дефектів	Випадки розташування кругових тріщин		
		1	2	3
f_1	2921.205	2903.150	2885.422	2861.387
f_2	4720.158	4692.315	4665.664	4479.272
f_3	5680.269	5649.661	5620.500	5581.477
f_4	6819.084	6789.231	6749.626	6302.471
f_5	7065.785	6990.163	6919.666	6642.533
f_6	7500.758	7413.592	7331.000	7141.964
f_7	8102.151	8048.182	8001.660	7672.579
f_8	8859.841	8707.775	8613.333	7798.775
f_9	9391.226	9294.208	8991.313	8072.096
f_{10}	9567.655	9313.043	9148.227	8376.308

Таблиця 3

Величини власних частот при шарнірному закріпленні торців оболонки і відсутності заповнювача

№	Відсутність дефектів	Випадки розташування кругових тріщин		
		1	2	3
f_1	2566.208	2524.886	2481.586	2077.264
f_2	4304.206	4216.108	3377.079	2424.309
f_3	4977.348	4532.853	4131.227	2908.600
f_4	5537.065	4919.126	4149.436	2983.402
f_5	6103.569	5055.981	4334.799	3692.771
f_6	6367.179	5656.613	4694.492	3756.809
f_7	6575.950	6002.876	4851.047	3845.039
f_8	6936.070	6285.556	5170.966	4140.599
f_9	6990.196	6460.007	5601.339	4619.477
f_{10}	7287.623	6628.973	5970.408	4981.385

Таблиця 4

Величини власних частот при шарнірному закріпленні торців оболонки і наявності заповнювача

№	Відсутність дефектів	Випадки розташування кругових тріщин		
		1	2	3
f_1	2746.031	2726.267	2705.855	2680.459
f_2	4616.208	4576.244	4536.415	4348.415
f_3	5312.591	5285.076	5257.376	5215.533
f_4	6550.184	6480.374	6391.443	5921.743
f_5	6837.833	6741.527	6661.656	6293.907
f_6	7198.128	7086.842	6969.333	6419.020
f_7	7531.633	7290.325	7071.069	6861.171
f_8	7649.621	7471.875	7416.717	6893.620
f_9	8309.874	8139.112	7644.563	7151.574
f_{10}	9179.904	8631.457	8029.028	7272.173

При розгляді дефектів структури по відношенню до її бездефектного стану при шарнірному закріпленні торців оболонки без пінопласту (табл. 3) в першому випадку також спостерігалось зменшення величини першої частоти на 1,61%, в другому – на 3,41% і в третьому – на 19,05%. А для десятої частоти f_{10} ці зміни мали наступні значення: 9,04%; 18,07%; 31,65%. При наявності пінопласту (табл. 4) і аналогічному закріпленні торців відсоткове зменшення першої власної частоти f_1 мало такі значення: 0,72%; 1,46%; 2,39% і десятої частоти f_{10} – 5,97%; 12,54%; 20,78%.

Висновки. Досліджено вплив тріщин різної довжини на спектр власних частот тришарових циліндричних елементів спеціальної техніки з неоднорідним заповнювачем. Наведені частотні спектри для різних видів граничних умов. Для характерних випадків жорсткого затиснення без пінопласту і шарнірного закріплення із пінопластом додатково для візуалізації наведені форми відповідних власних частот.

Аналіз розрахованих частот свідчить про те, що зміна перших власних частот за рахунок наявності відносно малої колової тріщини першого випадку за різних граничних умов відбувається в межах 0,62% - 1,61%, а десятих власних частот знаходиться у діапазоні 2,66% - 9,04%.

У другому випадку, коли довжина колової тріщини збільшуються вдвічі, діапазон змін перших власних частот тришарового циліндричного елемента за різних граничних умов зростає і розташовується в межах 1,22% - 3,41%, а десятих власних частот - 4,38% - 18,07%.

У третьому випадку діапазон змін перших власних частот циліндричного елемента за різних граничних умов зростає в межах 2,05% - 19,05%, а десятих власних частот - 12,45% - 31,65%.

Аналіз частотного спектру тришарового циліндричного елемента на присутність дефектів показує, що наявність тріщини у ребрі структури є фактором, який суттєво впливає на власну частоту такого елемента і призводить по суті до конструкційних змін цього елемента.

Отримані теоретичні результати впливу тріщин на власні частоти тришарових циліндричних оболонок з неоднорідним заповнювачем узгоджуються з даними експериментальної роботи [18].

Виконаний аналіз отриманих чисельних результатів вказує на те, що тріщини малих розмірів мало впливають на власну частоту конструкції. При виникненні відносно великих тріщин спостерігається більш значна зміна частотного спектру практично вже нової тришарової конструкції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Акимов Д.В., Грицак В.З., Гоменюк С.Н. и др. Математическое моделирование и исследование прочности силовых элементов конструкций космических летательных аппаратов // Вісник Запорізького університету. Фізико-математичні науки. 2015.– №3, С. 6-13.
2. Акимов Д.В., Клименко Д.В., Ларионов И.Ф. и др. Конечноеэлементный анализ и экспериментальное исследование прочности трехслойной сотовой конструкции переходного отсека космического летательного аппарата // Проблемы прочности. 2016. №3, - С. 52-57.
3. Акимов Д.В., Грицак В.З., Гоменюк С.И. и др. Экспериментальное исследование деформированного состояния и прочности межступенчатого отсека ракетносителя при статическом внешнем нагружении // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 2016. №1, – С.82-89.

4. Акимов Д.В., Гришчак В.З., Гоменюк С.И. и др. Численно-экспериментальный анализ напряженно-деформированного состояния топливного бака третьей ступени ракетоносителя // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 2018. № 2. С. 98–105.
5. Алифанова О.А., Ингульцев В.Л. Устойчивость и собственные колебания трехслойных оболочек вращения // Сопротивление материалов и теория сооружений. – К.: Будивельник, 1977. – №31. – С. 12–16.
6. Бехер С. А., Бобров А. Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии // учеб. пособие — Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2013. — 145 с.
7. Будах В.Д., Григоренко А.Я., Борисенко М.Ю., Бойчук Е.В. Определение собственных частот эллиптической оболочки постоянной толщины методом конечных элементов // Мат. методи та фіз.-мех. поля, 2014. –57, № 1. – С. 145–152.
8. Будах В.Д., Григоренко О.Я., Борисенко М.Ю., Бойчук О.В. Вплив ексцентриситету еліптичної оболонки на розподіл її динамічних характеристик // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, серія: «Фізико-математичні науки», 2015. – 2. – С. 23–28.
9. Григоренко А.Я., Пузырев С.В., Волчек Е.А. Исследование свободных колебаний некруговых цилиндрических оболочек с помощью метода слайд-коллокации // Мат. методи та фіз.-мех. поля, 2011. – 54, № 3. – С. 60–69.
10. Гулгазарян Г.Р. Формула распределения частот цилиндрической оболочки с произвольно направляющей // Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1979. – № 2. – С.139–143.
11. Дроздов О. В., Харченко В. В., Дзюба В. С. и др. Многофункциональная информационно-измерительная система РМХ-TEST для оснащения стендов и установок при проведении прочностных испытаний материалов, моделей и элементов конструкций из композиционных материалов // Проблемы прочности, 2016. №5. –С.52–60.
12. Ефимова Т.Л. Решение задач о свободных колебаниях толстостенных ортотропных неоднородных цилиндров // Мат. методи та фіз.-мех. поля, 2009. – Т.52. – С. 92–100.
13. Зайцев Б.Ф., Протасова Т.В., Клименко Д.В. и др. Динамический анализ композитного обтекателя ракеты при отделении с учетом расслоения структуры // Авиационно-космическая техника и технология. – 2020. – № 8/168. – С. 19–26.
14. Лекомцев С.В. Конечно-элементные алгоритмы расчёта собственных колебаний трёхмерных оболочек // Вычислительная механика сплошных сред, 2012. – Т.5, №2. – С. 233–243.
15. Луговой П.З., Сиренко В.М., Котенко К.Е., Луговой П.М. Динаміка тришарових неоднорідних циліндричних оболонок на пружній основі при нестационарних навантаженнях // Прикл. Механіка. 2024. 60, № 3. С 32–44.
16. Марчук М., Клименко Д., Харченко В., Хом'як М. Математична модель та метод розрахунку шаруватих композиційних оболонок обертання з розшаруваннями // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів: ИПММ ім. Я. С. Підстригача НАНУ, 2014. С.66–69.
17. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. – М: ДМК Пресс, 2013. – 784 с.
18. Ali M. Al-Shammari M.A. Effect of Cracks on the Natural Frequency of Cylindrical Shell Structures // Engineering and Technology Journal. 2020. 38(12A). P. 1808–1817.
19. Bepalova E. I., Urusova G. P. Determining the natural frequencies of highly inhomogeneous shells of revolution with transverse strain // Int. Appl. Mech. 2005. – 41, №4. – P. 980 – 987.
20. Budak V.D., Grigorenko A.Ya., Horushko V.V., Borisenko M.Yu. Holographic Interferometry Study of the Free Vibrations of Cylindrical Shells of Constant and Variable Thickness // Int. Appl. Mech. – 2014. – 50, № 1. – P. 68 – 74.
21. Hudramovich V.S., Sirenko V.N., Klimenko D.V., et al. Розробка нормативної методики обґрунтування залишкового ресурсу пускових конструкцій корпусів ракет-носіїв // Strengths of Materials, 2019. V5. P. 333 – 340.
22. Lugovoi P.Z., Sirenko V.N., Skosarenko Yu.V., Batutina T.Ya. Dynamics of a Discretely Reinforced Cylindrical Shell Under a Local Impulsive Load // Intern. Appl. Mech. – 2017, 53, № 2 – P. 173–180.
23. Lugovoi P.Z., Prokopenko N. Ya., Orlenko S.P. Effect of the Number of Ribs on a Transient in a Cylindrical Shell under a Disturbing Load // Int. Appl. Mech. – 2021. – 57, N 3. – P. 290 – 296.
24. Lugovoi P. Z., Sirenko V. M., Klimenko D.V., Kotenko K. E. Transient Processes in Three-Layer Cylindrical Elements with Inhomogeneous Core Under Combined Nonstationary Loads // Int. Appl. Mech. – 2023. – 59, № 5. – P. 573 – 584.
25. Solodov I., Rahammer M., Gulnizkiy N. & Kreutzbruck M. Noncontact Sonic NDE and Defect Imaging Via Local Defect Resonance // 2016. Volume 35, article number 48.
26. Zarutskii V.A. Prokopenko N.Ya. Natural Vibrations of Ribbed Cylindrical Shells with Low Shear Stiffness // Int. Appl. Mech. 2005. – 41, №4. – P. 392 – 396.

REFERENCES

1. Akimov D.V., Grishchak V.Z., Gomenyuk S.N., et al. Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie prochnosti silovykh elementov konstruktsiy kosmicheskikh letatel'nykh apparatov (Mathematical modeling and research of strength of power elements of spacecraft structures) – Visnik Zaporiz'kogo universitetu. Fiziko-matematichni nauki. 2015. – №3. – P. 6–13
2. Akimov D.V., Klimenko D.V., Lariionov I.F., et al. Konechnoelementnyy analiz i eksperimental'noe issledovanie prochnosti trekhslonnoy sotovoy konstruktsii perekhodnogo otkesa kosmicheskogo letatel'nogo apparata (Finite element analysis and experimental study of the strength of a three-layer honeycomb structure of a spacecraft transition compartment) // Problemy prochnosti, 2016. №3 - P. 52–57.
3. Akimov D.V., Grishchak V.Z., Gomenyuk S.I., et al. Eksperimental'noe issledovanie deformirovannogo sostoyaniya i prochnosti mezhtupenchatogo otkesa raketonositelya pri staticheskoy vneshnem nagruzhennii (Experimental study of the deformed state and strength of the interstitial compartment of a rocketosetelya under static external loading) // Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni, 2016. №1 – P. 82–89.
4. Akimov D.V., Grishchak V. Z., Gomenyuk S.I., et al. Chislenno-eksperimental'nyy analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya toplivnogo baka tret'ey stupeni raketonositelya (Numerical and experimental analysis of the stress-strain state of the third stage fuel tank of a launch vehicle) // Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni, 2018. №2, – P. 98–105.
5. Alifanova O.A. Ingul'cev V.L. Ustoychivost' i sobstvennyye kolebaniya trekhslonnykh obolochek vrashcheniya (Stability and natural oscillations of three-layer shells of revolution) // Soprotivlenie materialov i teoriya sooruzheniy. – K.: Budivelnik, 1977. – №31. – P. 12–16.
6. Bekher S. A., Bobrov A. L. Osnovy nerazrushayushchego kontrolya metodom akusticheskoy emissii (Fundamentals of non-destructive testing using acoustic emission method) // ucheb. posobie — Novosibirsk: Izd-vo SGUPSa, 2013. — 145 p.

7. Budak V.D., Grigorenko A.Ya., Borisenko M.Yu., Boichuk E.V. Opredelenie sobstvennykh chastot ellipticheskoy obolochki postoyannoy tolshchiny metodom konechnykh elementov (Determination of natural frequencies of an elliptical shell of constant thickness using the finite element method) // Mat. metodi ta fiz.-mekh. polya, 2014. – 57, № 1. – P. 145-152.
8. Budak V.D., Hryhorenko O.Ya., Borysenko M.Yu., Boichuk O.V. Vplyv ekscentrycity etliptichnoi obolonky na rozpodil yii dynamichnykh kharakterystyk (Influence of the eccentricity of an elliptical shell on the distribution of its dynamic characteristics) // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka, seria: «Fizyko-matematychni nauky», 2015. – 2. – S. 23-28.
9. Grigorenko A.Ya., Puzryev S.V., Volchek E.A. Issledovanie svobodnykh kolebaniy nekrugovoyh cilindricheskikh obolochek s pomoshch' metoda splajn-kollokatsii (Study of free vibrations of non-circular cylindrical shells using the spline collocation method) // Mat. metodi ta fiz.-mekh. polya, 2011. – 54, № 3. – P. 60-69.
10. Gulgazaryan G.R. Formula raspredeleniya chastot cilindricheskoy obolochki s proizvol'no napravlyayushchei (Frequency distribution formula for a cylindrical shell with an arbitrary guide) // Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela, 1979. – № 2. – P. 139-143.
11. Drozdov O.V., Harchenko V.V., Dzyuba V.S., ta in. Mnogofunktsional'naya informatsionno-izmeritel'naya sistema PMX-TEST dlya osnashcheniya stendov i ustanovok pri provedenii prochnostnykh ispytaniy materialov, modelei i elementov konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov (Multifunctional information and measuring system PMX-TEST for equipping stands and installations during strength testing of materials, models and structural elements made of composite materials) // Problemy prochnosti, 2016. №5, –P. 52-60.
12. Efimova T.L. Reshenie zadach o svobodnykh kolebaniyakh tolstostennykh ortotropnykh neodnorodnykh cilindrov (Solution of problems on free vibrations of thick-walled orthotropic inhomogeneous cylinders) // Mat. Metodi ta fiz.-mekh. polya, 2009. – T.52. – S. 92-100.
13. Zajcev B.F., Protasova T.V., Klimenko D.V. ta in. Dinamicheskii analiz kompozitnogo obtekatel'ya rakety pri otdelenii s uchedom rassloeniya struktury (Dynamic Analysis of a Composite Missile Fairing During Separation Taking into Account Structural Delamination) // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2020. – № 8/168. – P. 19–26.
14. Lekomev S.V. Konechno-elementnye algoritmy raschyota sobstvennykh kolebaniy trykhmernykh obolochek (Finite element algorithms for calculating natural vibrations of three-dimensional shells) // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred, 2012. – T.5, №2. – P. 233-243.
15. Luhovyi P.Z., Sirenko V.M., Kotenko K.E., Luhovyi P.M. Dynamika trysharovykh neodnorodnykh tsylindrichnykh obolonok na pruzhnii osnovi pry nestatsionarnykh navantazhenniakh (Dynamics of three-layer inhomogeneous cylindrical shells on elastic foundation under nonstationary loadings) // Prykl. Mekhanika. 2024. 60, № 3. P. 32-44.
16. Marchuk M., Klymenko D., Kharchenko V., Khom'iak M. Matematychna model ta metod rozrakhunku sharuvatykh kompozitsiinykh obolonok obertannia z rozsharuvanniamy (Mathematical model and method for calculating layered composite shells of rotation with delaminations) // Matematychni problemy mekhaniky neodnorodnykh struktur. – Lviv: IPPMM im. Ya. S. Pidstryhacha NANU, 2014. P. 66-69.
17. Rychkov S. P. Modelirovaniye konstruktsiy v srede Femap with NX Nastran (Modeling of structures in the Femap with NX Nastran environment) – M.: DMKPress, 2016. – 784 p.
18. Ali M. Al-Shammari M. A. Effect of Cracks on the Natural Frequency of Cylindrical Shell Structures // Engineering and Technology Journal. 2020. 38(12A). P. 1808-1817.
19. Bepalova E. I., Urusova G. P. Determining the natural frequencies of highly inhomogeneous shells of revolution with transverse strain // Int. Appl. Mech. 2005.– 41, №4. – P. 980 - 987.
20. Budak V.D., Grigorenko A.Ya., Horushko V.V., Borisenko M.Yu. Holographic Interferometry Study of the Free Vibrations of Cylindrical Shells of Constant and Variable Thickness // Int. Appl. Mech. – 2014. – 50, № 1. – P. 68 - 74.
21. Hudramovich V.S., Sirenko V.N., Klimenko D.V., et al. Pozrobka normativnoi metodyki obruntuvaniya zalishkovogo resursy puskovykh konstruktsiinykh korpusiv rakety-nosiv // Strengths of Materials, 2019. V5. P. 333 – 340.
22. Lugovoi P.Z., Sirenko V.N., Skosarenko Yu.V., Batutina T.Ya. Dynamics of a Discretely Reinforced Cylindrical Shell Under a Local Impulsive Load // Intern. Appl. Mech. – 2017, 53, № 2 – P. 173–180.
23. Lugovoi P. Z., Prokopenko N. Ya., Orlenko S.P. Effect of the Number of Ribs on a Transient in a Cylindrical Shell under a Disturbing Load // Int. Appl. Mech. – 2021. – 57, N 3. – P. 290 – 296.
24. Lugovyi P. Z., Sirenko V. M. Klimenko D.V., Kotenko K.E. Transient Processes in Three-Layer Cylindrical Elements with Inhomogeneous Core Under Combined Nonstationary Loads // Int. Appl. Mech. – 2023. – 59, № 5. – P. 573 – 584.
25. Solodov I., Rahammer M., Gulnizkij N. & Kreutzbruck M. Noncontact Sonic NDE and Defect Imaging Via Local Defect Resonance // 2016. Volume 35, article number 48.
26. Zarutskii V. A., Prokopenko N. Ya. Natural Vibrations of Ribbed Cylindrical Shells with Low Shear Stiffness // Int. Appl. Mech. 2005.– 41, №4. – P. 392 – 396.

Стаття надійшла 27.01.2025

Котенко К.Е., Клименко О.М., Орленко С.П.

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ НА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИШАРОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

При багаторазовому використанні оболонкових конструкцій з'являються конкретні проблеми теоретичних досліджень впливу появи різних конструктивних тріщин на динамічні характеристики тришарових циліндричних елементів з неоднорідним заповнювачем за різних граничних умов. Дослідження впливу таких тріщин на динамічні характеристики оболонкових елементів з неоднорідним заповнювачем є досить важливими і актуальними.

Проведено теоретичне дослідження спектра власних частот тришарової циліндричної оболонки з дискретно-симетричним легким, ребристим заповнювачем за наявності кільцевих тріщин. Методом скінченних елементів вирішується актуальна задача визначення власних частот тришарового елемента спеціальної техніки за різних граничних умов.

При дослідженні таких циліндричних оболонок розглядалися два типи дефектів – наскрізних колових тріщин в армуючих ребрах структур і три випадки їх розташування. Наведені частотні спектри для різних видів граничних умов. Для характерних випадків жорсткого затиснення без пінопласту і шарнірного закріплення із пінопластом додатково для візуалізації наведені форми відповідних власних частот.

Аналіз отриманих чисельних результатів дав змогу визначити характер впливу тріщин різної довжини на частотні спектри тришарових циліндричних оболонок з неоднорідним заповнювачем.

Частотний аналіз тришарового циліндричного елемента на присутність дефектів, показав що наявність тріщини у ребрі структури є суттєвим фактором, що впливає на власну частоту такого елемента і призводить по суті до конструкційних змін цього елемента.

Отримані теоретичні результати вказують на те, що тріщини малих розмірів мають малий вплив на власну частоту конструкції. При виникненні відносно великих тріщин спостерігається значна зміна частотного спектру практично нової тришарової конструкції.

Ключові слова: спектр власних частот, тришарова циліндрична оболонка, неоднорідний заповнювач, колова тріщина, граничні умови, метод скінченних елементів, вплив тріщин.

Kotenko K.E., Klymenko M.O., Orlenko S.P.

THE INFLUENCE OF DEFECTS ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THREE-LAYER CYLINDRICAL SHELL STRUCTURES

With repeated use of shell structures, specific problems arise in theoretical studies of the influence of the appearance of various structural cracks on the dynamic characteristics of three-layer cylindrical elements with inhomogeneous filler under different boundary conditions. Studies of the influence of such cracks on the dynamic characteristics of shell elements with inhomogeneous filler are quite important and relevant.

The theoretical study of the natural frequency spectrum of a three-layer cylindrical shell with a discretely symmetric light, ribbed filler in the presence of annular cracks has been conducted. The finite element method solves the current problem of determining the natural frequencies of a three-layer element of special equipment under different boundary conditions.

When studying such cylindrical shells, two types of defects were considered - through-through circular cracks in the reinforcing ribs of structures and three cases of their location. Frequency spectra are given for different types of boundary conditions. For typical cases of rigid clamping without foam plastic and hinged fastening with foam plastic, the shapes of the corresponding natural frequencies are additionally given for visualization.

The analysis of the obtained numerical results made it possible to determine the nature of the influence of cracks of different lengths on the frequency spectra of three-layer cylindrical shells with a inhomogeneous filler.

Frequency analysis of a three-layer cylindrical element for the presence of defects showed that the presence of a crack in the edge of the structure is a significant factor affecting the natural frequency of such an element and essentially leads to structural changes in this element.

The obtained theoretical results indicate that small cracks have a small influence on the natural frequency of the structure. When relatively large cracks occur, a significant change in the frequency spectrum of an almost new three-layer structure is observed.

Key words: natural frequency spectrum, three-layer cylindrical shell, inhomogeneous aggregate, circular thickness, boundary conditions, finite element method, effect of cracks.

УДК 539.3

Котенко К.Е., Клименко О.М., Орленко С.П. Вплив дефектів на динамічні характеристики тришарових циліндричних оболонок конструкцій // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. – 2025. – Вип. 114. – С. 183-192.

Табл. 4. Іл. 5. Бібліогр. 26 назв.

UDC 539.3

Kotenko K.E., Klymenko M.O., Orlenko S.P. The influence of defects on the dynamic characteristics of three-layer cylindrical shell structures // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. – 2025. – Issue 114. – P. 183-192.

Tabl. 4. Fig. 5. Ref. 26.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри теоретичної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури; КОТЕНКУ Костянтину Едуардовичу

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

ORCID ID: <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; КЛИМЕНКУ Миколі Олександровичу

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра машин і обладнання технологічних процесів, КЛИМЕНКО М.О.

Роб. тел.: +380 (44) 241-55-48

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

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

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій інституту механіки ім. С.П. Тимошенка; ОРЛЕНКО Сергій Петрович

Адреса робоча: 03057 Україна, м. Київ, вул. Нестерова, 3, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України; ОРЛЕНКУ Сергію Петровичу

E-mail: orlenko_sergey@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7857-9601>