

Каіров Олексій¹, Каіров Володимир²

¹професор, докт. техн. наук, професор, Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна, e-mail: alexkairov2@gmail.com

²доцент, канд. техн. наук, доцент, Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна, e-mail: vladimir.kairov@gmail.com

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКТИВНО НЕОДНОРІДНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розглянуто вимушені коливання підкріплених ребрами циліндричних оболонок з отворами та приєднаними твердими тілами. Розроблена уточнена математична модель напружено-деформованого стану оболонкової системи, що враховує конструктивну неоднорідність оболонкової системи. Задача розв'язується в лінійній постановці методом скінчених елементів з урахуванням дискретного розміщення ребер. Наведено результати чисельного дослідження впливу нормальної рівномірно розподіленої збуджуючої сили, що змінюється за гармонійним законом, отворів, приєднаних твердих тіл та інших конструктивних особливостей на амплітуди вимушених коливань, деформації і напруження оболонки.

Ключові слова: неоднорідна циліндрична оболонка, напружено-деформований стан, вимушені гармонічні коливання, отвори, підкріплюючі ребра, приєднані тверді тіла, метод скінчених елементів.

Вступ. Особливе місце в розрахунковій практиці інженерних конструкцій займають завдання розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) тонких пружних конструктивно неоднорідних оболонок з дискретно приєднаними твердими тілами. Підвищення їх віброміцності та несучої здатності при динамічному навантаженні має важливе практичне значення. Отвори, приєднані тіла і підкріплюючі ребра створюють конструктивну неоднорідність оболонкових конструкцій і роблять істотний вплив на їх амплітудно-частотні характеристики та напружений стан. Огляд досліджень, присвячених даній проблемі, наведено в роботах [1, 2, 5].

Метою даної роботи є дослідження впливу отворів, підкріплюючих ребер, приєднаних твердих тіл та їх дискретного розміщення на напружено-деформований стан оболонкової системи.



Матеріал і результати досліджень. Розглядається тонка пружна оребрена оболонка обертання з регулярним підкріпленням стрингерами і шпангоутами, що має вирізи і несе приєднані тверді тіла, дискретно розподілені на зовнішній поверхні (рис. 1). На оболонку діє нормально рівномірно розподілене навантаження, що змінюється в часі по гармонійному закону. Деформований стан оболонкової системи розглядається в лінійній постановці на основі теорії тонких пружних оболонок з використанням гіпотез Кірхгофа-Лява.

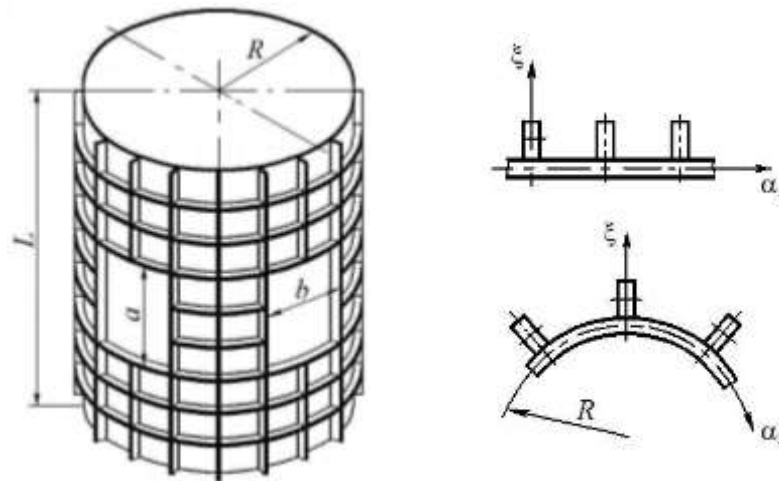


Рисунок 1 – Модель оболонкової структури

Задача вирішується методом скінченних елементів (МСЕ) [4, 6]. Опис динамічної поведінки оболонки виконується шляхом її дискретизації ізопараметричними скінченними елементами. Використовуючи варіаційний принцип Лагранжа, отримаємо рівняння гармонійних коливань оболонкової системи:

$$[M] \left\{ \frac{d^2 q}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{dq}{dt} \right\} + [K] \{q\} = \{F\}, \quad (1)$$

де $\{q\}$ – вектор узагальнених переміщень вузлів скінченно-елементної оболонкової моделі; $[K], [M]$ – матриці жорсткості та мас; $[C] = 2\xi[M]$ – матриця демпфування; ξ – коефіцієнт демпфування; $\{F\}$ – вектор обурюючих зовнішніх сил.

Обчислення амплітуд вібропереміщень виконується методом розкладання переміщень за власними формами коливань [4]. В задачах гармонічного аналізу використовуються ті ж самі матриці жорсткості $[K]$ та мас $[M]$, що і в модальному аналізі. Матриця демпфування $[C]$ враховує дисипацію енергії, що пов'язана з внутрішнім тертям матеріалу, характером з'єднань елементів конструкції між собою та



амплітудно-частотними характеристиками [4]. Коефіцієнти демпфування визначаються для всієї оболонкової системи виходячи з її дисипативних властивостей і демпфуючої здатності [3].

Рішення системи (1) для малих коливань шукаємо в наступному вигляді:

$$\{q\} = \{q_0 (\cos \varphi + i \sin \varphi)\} e^{i\Omega t}, \quad (2)$$

де q_0 – вектор амплітуд переміщень вузлів моделі; $\{q_1\} = \{q_0 \cos \varphi\}$, $\{q_2\} = \{q_0 \sin \varphi\}$ – дійсна і уявна частина вектора переміщень; Ω – кругова частота збуджуючих зовнішніх сил; i – уявна одиниця; φ – зсув фаз для переміщень; t – координата часу.

Оскільки зовнішнє навантаження, що збурює коливання, періодичне, вектор динамічних сил може бути представлений у вигляді суми термінів тригонометричного ряду Фур'є аналогічно вектору переміщень:

$$\{F\} = \{F_0 (\cos \psi + i \sin \psi)\} e^{i\Omega t} = (\{F_1\} + i \cdot \{F_2\}) e^{i\Omega t}, \quad (3)$$

де F_0 – амплітуда сил; $\{F_1\} = \{F_0 \cos \psi\}$, $\{F_2\} = \{F_0 \sin \psi\}$ – дійсна і уявна частина вектора сил; ψ – зсув фаз для сил.

Після підстановки (2) і (3) в рівняння (1) та деяких перетворень, отримаємо рівняння для визначення амплітуд коливань. Задача щодо визначення амплітуд і силових характеристик гармонійних коливань оболонкової конструкції вирішується методом суперпозиції мод [4]. З використанням отриманих значень амплітуд вимушених коливань у вузлах елемента, з використанням співвідношень Коші і закону Гука визначаються їх деформації і напруги.

Досліджено вплив різних граничних умов, рівномірно розподілених ребер, отворів та маси приєданого тіла на амплітудні характеристики та НДС сталеві оболонки. Виконано зіставлення отриманих чисельних результатів з рішеннями, отриманими з використанням пакету прикладних програм ANSYS і експериментальними даними.

Висновки. Отримані на основі розробленої уточненої математичної моделі чисельні результати показують, що приєдане тверде тіло і отвори роблять істотний вплив на напружено-деформований стан і амплітудно-частотні характеристики тонкостінних оболонок. Виявлено нові залежності, закономірності і механічні ефекти, обумовлені конструктивними неоднорідностями оболонкової системи, що мають важливе наукове і практичне значення і дозволяють розробити заходи щодо поліпшення її вібродинамічних характеристик. Методика розрахунку на основі МСЕ може бути



використана при проектуванні конструктивно неоднорідних оболонкових конструкцій при розрахунках на динамічне навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каіров, В.О., & Шевченко, В.П. (2015). Напружено-деформований стан підкріплених оболонок з приєднаними твердими тілами при вимушених коливаннях. *Вісник Дніпропетровського університету: Науковий журнал. Серія: Механіка.* (19), 56-64.
2. Селиванов, Ю.М., & Ключник, Д.В. (2007). Голографічний і скінченно-елементний аналіз власних коливань циліндричної оболонки, ослабленої круговим отвором. *Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла,* (8), 140-149.
3. Трощенко, В.Т., & Курият, Р.І., & Лебедев, А.А. (2005) *Міцність матеріалів і конструкцій.* К.: Академперіодика.
4. Bathe, K.J. (2006). *Numerical methods in finite element analysis.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
5. Kairov A.S. Effect of holes of the eigenmodes of reinforced shells of rotations. (2001). *Journal of Mathematical Sciences.* (3), 393-397.
6. Zienkiewich, O.C., & Teylor, R.L. (2000). *The finite element method.* Oxford: Jordan Hill.

