

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

ГУДЬ МИХАЙЛО ІВАНОВИЧ

УДК 660.178

**ОЦІНЮВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТОНКОСТІННИХ
ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ
ЛІТАКОМ**

01.02.04 —механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Ясній Петро Володимирович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, ректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Силованюк Віктор Петрович
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
НАН України;
завідувач відділу теоретичних основ механіки руйнування;

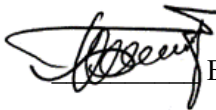
кандидат ф.-м. наук, науковий співробітник
Николишин Тарас Миронович
Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України,
науковий співробітник відділу термомеханіки.

Захист відбудеться ” 7 ” травня 2021 р. о 14.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий ” 6 ” квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б.Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Пошкодження конструкційних елементів РН при їх транспортуванні мають механічну природу внаслідок дії довготривалих циклічних навантажень призводять до значних матеріальних збитків. Оцінка міцності та втомної довговічності конструкційних елементів ракети-носія (РН) при транспортуванні є комплексною фундаментальною проблемою, яка вимагає розробки ряду методик, зокрема вимірювань зовнішніх впливів; аналізу та обробки зовнішніх впливів; оцінки навантаженості елементів конструкцій РН та опор кріплення; розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкцій РН; прогнозування втомної довговічності елементів конструкцій (до зародження тріщин).

Основні дослідження спрямовані на розробку експериментально-аналітичних методологій, які поєднують інформаційні системи вимірювання зовнішніх впливів, скінченноелементне моделювання натурних конструкцій, розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) та виявлення найбільш навантажених ділянок РН, методики оцінки та моніторингу пошкоджуваності і втомної довговічності конструкційних елементів РН. Незважаючи на ряд досліджень, присвячених розробці методик визначення вимушених і власних коливань циліндричних оболонок РН та експериментальних досліджень впливу експлуатаційних факторів на частоти вимушених коливань циліндричних оболонок РН ці підходи потребують подальшого обґрунтування, зокрема, на випадок транспортування РН літаком.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати, що складають основу дисертації, отримані здобувачем, як виконавцем держбюджетної теми «Розробка методів розрахунку експлуатаційних впливів і моніторингу довговічності елементів конструкції ракети носія при транспортуванні літаком» (№ державної реєстрації 0115U002448), яка виконувалась у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя у 2015 - 2017 рр. за тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України. Тематика наукових досліджень відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є виявлення основних закономірностей впливу конструктивних особливостей на НДС і власні частоти модельної підсиленої оболонки при транспортуванні. Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні завдання:*

- розробити методику і обґрунтувати геометричні і фізичні параметри моделі першої ступені РН у вигляді підсиленої циліндричної оболонки;
- методом скінченних елементів (МСЕ) провести модальний аналіз та дослідити власні частоти і форми коливань моделі гладкої циліндричної оболонки;
- розробити математичну модель та отримати аналітичні розв'язки власних частот коливань непідсиленої циліндричної оболонки;
- визначити вплив конструктивних факторів на частоти власних коливань підсиленого циліндра;
- дослідити вплив власних частот на напружено-деформований стан повнорозмірної підсиленої циліндричної оболонки;
- на базі випробувальної сервогідравлічної машини СТМ-100 опрацювати методику і дослідити вплив частоти та амплітуди навантаження на вимушені коливання підсилених циліндричних оболонок.

Об'єкт дослідження – модельна конструкція першої ступені РН.

Предмет дослідження – напружено - деформований стан і частоти власних коливань модельної конструкції РН з урахуванням конструктивних особливостей.

Методи дослідження Моделювання НДС підсиленої циліндричної оболонки та визначення частот власних коливань чисельними і аналітичними методами. Експериментальні дослідження вимушених коливань підсилених циліндричних оболонок.

Достовірність результатів досліджень власних частот моделі методом скінченних елементів підтверджується їх узгодженістю із аналітичними обчисленнями та експериментальними даними.

Наукова новизна отриманих результатів

- розроблено методику масштабування і обґрунтовано геометричні і фізичні параметри моделі першої ступені РН у вигляді підсиленої циліндричної оболонки;
- МСЕ досліджено власні частоти циліндричної, підсиленої стрингерами тонкостінної модельної конструкції першої ступені РН.
- розроблено математичну модель циліндричної тонкостінної гладкої оболонки, на основі якої визначено частоти власних коливань непідсиленої циліндричної оболонки.
- отримала подальший розвиток методика комп'ютерного моделювання і виявлено основні закономірності пливу частот та амплітуд власних коливань на напружено-деформований стан підсиленої циліндричної оболонки для великого числа мод.
- розроблено методику експериментальних досліджень впливу частоти та амплітуди навантаження на вимушені коливання підсиленої стрингерами циліндричної оболонки.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропонована методика моделювання власних коливань підсилених циліндричних оболонок може бути використана при виборі конструктивних і геометричних параметрів виробів у вигляді тонкостінних циліндричних оболонок на етапі проектування. Методика експериментального дослідження впливу конструктивних факторів на вимушені коливання модельної циліндричної оболонки може бути застосована при обґрунтуванні геометричних параметрів циліндричних тонкостінних оболонок. ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля підтвердило використання результатів роботи в частині методики моделювання власних коливань підсилених циліндричних оболонок з урахуванням впливу фізико-механічних характеристик наповнювача, а також експериментального дослідження впливів конструктивних факторів на вимушені коливання масштабної циліндричної оболонки та методики аналітичного розрахунку НДС елементів конструкції РН при дії максимальних навантажень при транспортуванні.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: закономірності впливу конструктивних особливостей на частоти та

форми коливань повнорозмірної оболонки [1,6,7,9]; аналітичні розв'язки власних частот коливань невідсиленої циліндричної оболонки [2,12]; розроблення методики і результати експериментального дослідження впливу частоти та амплітуди навантаження на вимушені коливання підсилені циліндричних оболонок [3,8]; оцінка власних частот коливань масштабної моделі оболонки та обґрунтування її розмірів [4,10,11], аналіз напружено деформованого стану підсиленої оболонки при вільних поперечних коливаннях [5].

Формулювання задач, аналіз і трактування одержаних результатів та можливостей їх практичного застосування проведено спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, зокрема на: V Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів. «Актуальні задачі сучасних технологій» – (Тернопіль, 2016), V та VI Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (Тернопіль, 2017 - 2019), XIX МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Київ, 2018), Міжнародній науково-технічній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті) (Тернопіль, 2018). Окремі результати дисертаційної роботи використані при написанні посібника «Методи моніторингу та розрахунку експлуатаційних впливів і динаміки руху колісних транспортних систем при транспортуванні великогабаритних вантажів: навчальний посібник для студентів усіх форм навчання».

В повному обсязі роботу доповідали і обговорювали на науковому семінарі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 2021).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 13 друкованих працях, з них 4 – статті у фахових наукових журналах і збірниках[1,3-5], 1– стаття у закордонному виданні внесеному до науково-метричної бази Scopus[2], 7 – тез та праць у збірниках наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 123 сторінки, в т. ч. 48 рисунків, 14 таблиць та список використаних літературних джерел із 127 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проаналізовано сучасний стан розв'язуваної в роботі задачі, обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, розкрито питання апробації результатів дисертації на конференціях і семінарах та висвітлення їх у друкованих працях.

У першому розділі проаналізовані літературні дані стосовно навантаженості довгомірних тонкостінних оболонок підчас транспортування наземним та водним транспортом, в т.ч. РН.

Проаналізовано існуючі методики експериментального дослідження, вимірювання та статистичної обробки прискорень, що виникають при транспортуванні РН на судні типу «Кондок-4».

Для забезпечення цілісності РН при транспортуванні повітряними суднами необхідно дослідити спектр навантаження при транспортуванні, форми і частоти власних коливань аналітичним і числовим методом з урахуванням впливу геометричних розмірів, способу закріплення, а також підсилення оболонок.

У другому розділі проведено розрахунок впливів при транспортуванні літаком та оцінювання навантаженості елементів конструкції РН з використанням модального аналізу власних коливань.

Чисельне моделювання виконували в програмному комплексі ANSYS APDL, який базується на МСЕ. Для визначення частот і форм (мод) власних коливань конструкції використовували модальний аналіз.

У декартових координатах створювали скінченноелементну модель тонкостінного циліндра без підсилення (Рис.1а) та з підсиленням стрингерами (Рис.1б). Початок координат розміщений у центрі торця циліндра у площині YZ. Повздовжньою віссю циліндра є вісь X.

Довжина циліндра становила 6,3 м, діаметр 1,8 м, товщина стінки 0,0015 м. У підсиленій моделі використовували стрингери

типу ПР109-4 (32 шт.) і ПР109-12 (8 шт.), які розміщували на внутрішній поверхні оболонки симетрично та з постійним кроком.

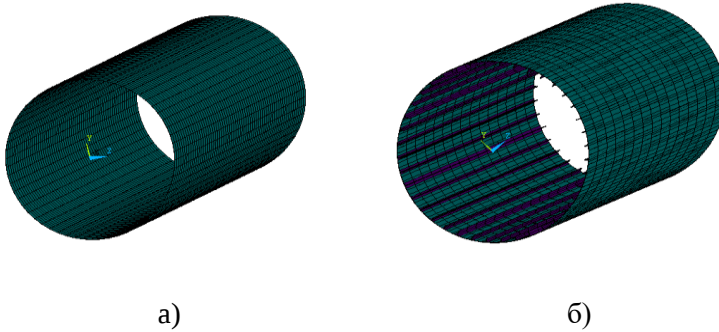


Рисунок 1. Скінченноелементні моделі тонкостінних циліндрів без підсилення (а) та з підсиленням стрингерами (б)

Для розв'язку використано блочний метод Ланцоша, призначений для відшукування великого числа мод (більше 40) для великих моделей.

Із результатів обчислень [1] (вибірка з перших 10 мод) власних частот (Табл. 1) помітно, що непідсилена та підсилена оболонки мають кратні власні частоти, що характерно для конструкцій з осью симетрії (Рис.2,3). Варто відмітити, що власні частоти підсиленої оболонки є меншими, що є наслідком збільшення жорсткості конструкції.

Таблиця 1. Власні частоти (Гц) непідсиленої та підсиленої оболонок з урахуванням власної ваги

№	Непідсилена оболонка	Підсилена оболонка
1	18,8	14,2
2	18,8	14,2
3	19,4	14,9
4	19,4	14,9
5	23,5	16,5
6	23,5	16,5
7	24,2	19,9
8	24,2	20,2
9	29,8	20,2
10	29,8	20,7

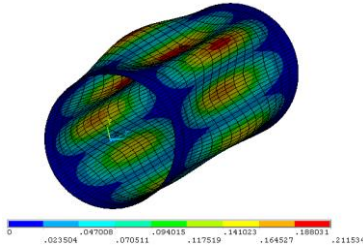


Рисунок 2. Форма коливань непідсиленої циліндричної оболонки за 2-ю модою при частоті 18,8 Гц

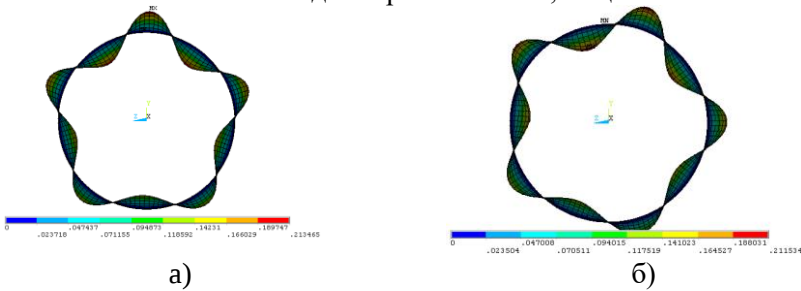


Рисунок 3. Зміщені на чверть довжини хвилі форми коливань непідсиленої циліндричної оболонки за 2-ю модою при частоті 18,8 Гц

Визначено (Рис. 4) власні частоти непідсиленого та підсиленого стрингерами тонкостінних циліндрів. Встановлено, що внаслідок збільшення жорсткості конструкції, значення власних частот підсиленої стрингерами циліндричної оболонки (Рис.4, крива 1) є меншими у порівнянні з непідсиленою (Рис.4, крива 2).

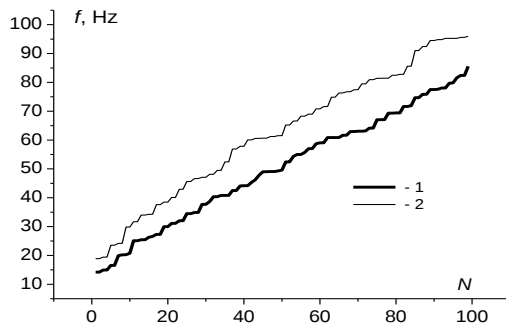


Рисунок 4. Власні частоти підсиленого (1) та непідсиленого тонкостінних циліндричних оболонок (2)

Подано аналітичну методику розрахунку власних коливань гладких циліндричних оболонок.

Для аналітичного дослідження коливань циліндричних оболонок використаємо рівняння у вигляді [2]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1-\nu}{2}(1+k) \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \varphi} + \frac{\partial^3 \varpi}{\partial \xi^3} - \frac{1-\nu}{2} k \frac{\partial^3 \varpi}{\partial \xi \partial \varphi^2} - \nu \frac{\partial \varpi}{\partial \xi} = \rho R^2 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} \\ & \frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \varphi} + \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{1-\nu}{2}(1+3k) \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{3-\nu}{2} k \frac{\partial^3 \varpi}{\partial \xi^2 \partial \varphi} - \frac{\partial \varpi}{\partial \varphi} = \rho R^2 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} \quad (1) \\ & k \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} - \frac{1-\nu}{2} k \frac{\partial^3 v}{\partial \xi \partial \varphi^2} - \nu \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{3-\nu}{2} k \frac{\partial^3 v}{\partial \xi^2 \partial \varphi} - \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \varpi + k \left[\frac{\partial^4 \varpi}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^4 \varpi}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^4 \varpi}{\partial \varphi^4} + 2 \frac{\partial^2 \varpi}{\partial \varphi^2} + \varpi \right] = \\ & = -\rho R^2 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \frac{\partial^2 \varpi}{\partial \tau^2}, \\ & \text{тут } \xi = \frac{x}{R}; k = \frac{h^2}{12R^2} \quad (2) \end{aligned}$$

Загальний розв'язок (1) шукається у вигляді:

$$\begin{aligned} u &= U(\xi) \sin(n\varphi + \varphi_0) e^{i\omega t} \\ v &= V(\xi) \cos(n\varphi + \varphi_0) e^{i\omega t} \quad (3) \\ \varpi &= W(\xi) \sin(n\varphi + \varphi_0) e^{i\omega t}. \end{aligned}$$

Результати аналітичних розрахунків та відносну похибку чисельного методу наведено у табл.2.

Таблиця 2. Власні частоти коливань циліндричної оболонки, визначені аналітичним та чисельним методами (в Гц)

№	МСЕ	Аналітичний метод	Відносна похибка чисельного методу, %
1	18,8	19,1	10,1
2	18,8	19,1	10,1
3	19,4	19,7	9,75
4	19,4	19,7	9,75
5	23,5	23,9	10,7
6	23,5	23,9	10,7
7	24,2	24,6	10,4
8	24,2	24,6	10,4

Продовження табл.2

9	29,8	30,3	10,5
10	29,8	30,3	10,5

Для обґрунтування розмірів і конструктивних особливостей моделі, методом скінчених елементів (МСЕ) з використанням програмного забезпечення ANSYS досліджено власні частоти коливань повнорозмірної циліндричної оболонки та її масштабної моделі. Результати розрахунків подано в табл. 3. Помітно, що власні частоти коливань масштабної моделі більш як на порядок перевищують власні частоти повнорозмірної циліндричної оболонки.

Для наближення частот власних коливань модельної оболонки до повнорозмірної циліндричної оболонки, досліджено вплив наповнювача на частоти власних коливань підкріпленої оболонки. Розглядали три типи наповнювача з наступними фізико-механічними властивостями:

А) $\rho = 1,0 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$, $E = 1,6 \text{ МПа}$;

Б) $\rho = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$, $E = 1,6 \text{ МПа}$;

В) $\rho = 2,0 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$, $E = 1,6 \text{ МПа}$

Як помітно з результатів дослідження (Табл.3) наповнювач (тип А) у 10 - 20 разів зменшує власні частоти коливань підсиленої моделі, при використанні наповнювача по типу В, власні частоти по перших 12 модах відсутні. Таким чином, використання наповнювача типу А дозволяє побудувати модель циліндричної оболонки з характеристиками власних частот наближеними до повнорозмірної оболонкової конструкції. Це є важливо для обґрунтування методик експериментальних досліджень вимушених і власних коливань і втомної міцності таких оболонок з використанням масштабних малорозмірних конструкцій.

Таблиця 3. Власні частоти повнорозмірних та модельної підсиленої оболонки з урахуванням власної ваги із наповнювачем та без нього (в Гц)

№ мо ди	Власна частота коливань повнорозмірної підкріпленої оболонки	Власна частота коливань підкріпленої модельної оболонки (без наповнювача)	Власна частота коливань оболонки	
			з наповню вачем по типу А	з наповню вачем по типу Б
1	14,2	153,7	7,2	-

Продовження табл.3

2	14,2	153,7	9,1	-
3	14,9	162,1	9,8	-
4	14,9	162,1	10,9	-
5	16,5		11,0	1,03
6	16,5		12,0	4,74
7	19,9		12,1	5,62
8	20,2		12,7	6,08
9	20,2		12,7	6,25
10	20,7		13,2	6,75
11	24,9		13,3	7,23
12	24,9		14,1	7,63

У третьому розділі з використанням розробленої методики [3] експериментально досліджено вплив конструктивних факторів на вимушені коливання модельної оболонки [4].

До штока випробувальної машини кріпили платформу у вигляді просторової ферми (Рис. 5), на яку встановили експериментальну модель підсиленої циліндричної оболонки з розміщеними на ній необхідними датчиками вимірювання амплітуди коливань, віброшвидкості та віброприскорення (Рис.6). Оболонку фіксували спеціальним затискним пристроєм, що імітує шарнірне закріплення контурів. Для зменшення інерційних зусиль і переміщень ферму виготовили з алюмінієвого кутника 10 x 10 x 1 мм.

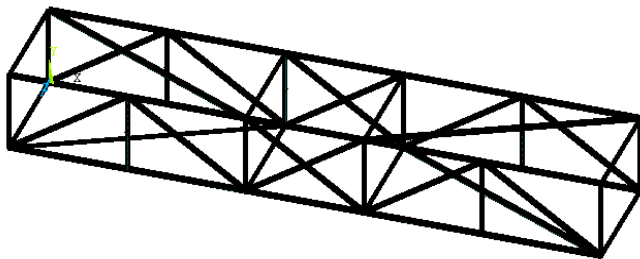


Рисунок 5. Просторова ферма для розміщення підсиленої циліндричної оболонки

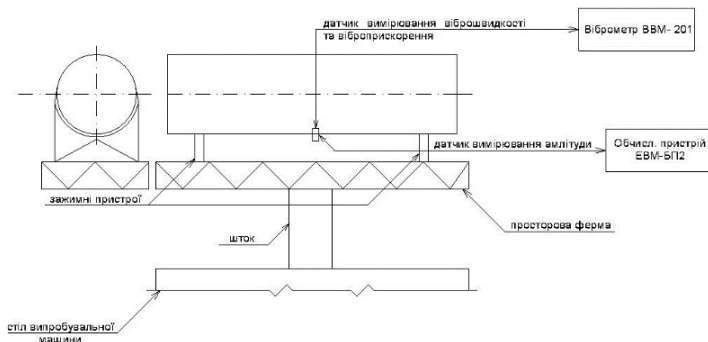


Рисунок 6. Схема кріплення моделі, вимірювання параметрів коливань на випробувальній машині STM-100

Загальний вид експериментальної установки для дослідження навантаженості і втомної довговічності тонкостінних циліндричних оболонок при транспортуванні на базі випробувальної машини STM-100 подано на рис. 7.



Рисунок 7. Експериментальна установка для дослідження навантаженості і втомної довговічності тонкостінних циліндричних оболонок при транспортуванні на базі випробувальної машини STM-100

Частота зовнішнього навантаження при експериментальному дослідженні підсиленої ненаповненої та наповненої оболонки змінювалась від 10 Гц до 25 Гц. Амплітуда переміщення штоку машини була сталою $v=0,2$ мм.

Виявлено (Рис.8), що із збільшенням частоти прикладеного навантаження від 10 до 20 Гц частота вимушених коливань підсиленої циліндричної оболонки збільшується прямо пропорційно від 0,5 Гц до 1,5 Гц. Максимальна амплітуда вимушених коливань підсиленої циліндричної оболонки обернено пропорційна до частоти

прикладеного навантаження і зменшується втричі при збільшенні частоти від 10 до 20 Гц (Рис.9).

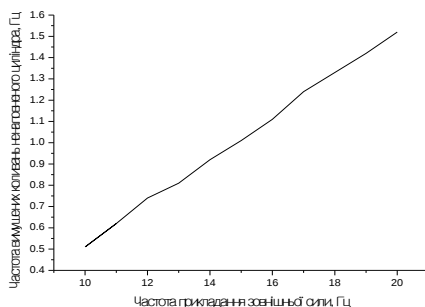


Рисунок 8. Залежність частоти вимушених коливань підсиленої моделі оболонки без наповнювача від частоти прикладання зовнішньої сили

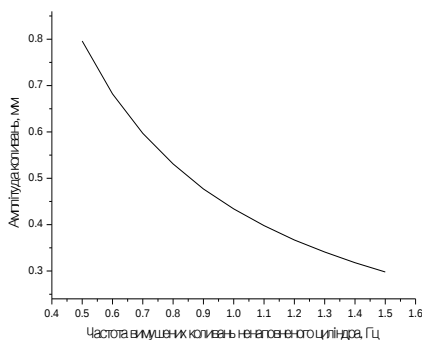


Рисунок 9. Залежність амплітуди підсиленої моделі оболонки без наповнювача в залежності від частоти вимушених коливань

Для експериментального дослідження наповненої моделі використали підсилену оболонку фактичної масою $m = 27,4$ кг з наповнювачем типу А.

Отримано залежність частоти підсиленої наповненої оболонки від частоти прикладання зовнішнього навантаження (Рис. 10) та залежність амплітуди підсиленої наповненої оболонки від частоти вимушених коливань (Рис.11).

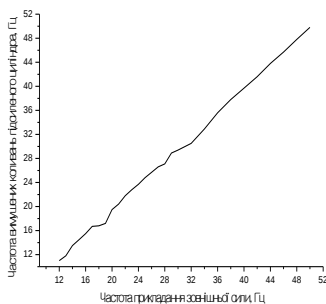


Рисунок 10. Залежність частоти вимушених наповненої моделі підсиленої оболонки від частоти прикладання зовнішнього навантаження

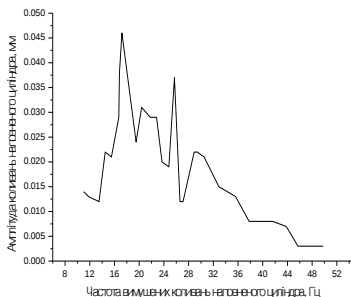


Рисунок 11. Залежність амплітуди наповненої моделі підсиленої оболонки в залежності від частоти вимушених коливань

Спостерігається аналогічна із ненаповненою оболонкою залежність частоти вимушених коливань відносно зовнішнього навантаження. Також, амплітуда вимушених коливань наповненої оболонки обернено пропорційна до частоти прикладеного зовнішнього навантаження. При частоті у 18 Гц та 26 Гц стрімко збільшується амплітуда коливань, що свідчить про виникнення резонансу. На основі отриманих експериментальних даних визначені граничні напруження підсиленої масштабної оболонки з наповнювачем. З використанням кривої втоми для сплаву Д16АТ визначену кількість циклів до руйнування в залежності від частоти вимушених коливань наповненої підсиленої модельної оболонки при сталоамплітудному зовнішньому навантаженні.

У четвертому розділі для повнорозмірної підсиленої циліндричної оболонки для великого числа мод, від дії навантажень

при транспортуванні авіацією, визначено основні місця концентрації нормальних і дотичних напружень та їхні значення [5].

Для випадку коливань за модою 1 наведено розподіл нормальних (рис.12 – 14) та дотичних напружень (рис. 15 - 17) в повнорозмірній підсиленій циліндричній оболонці вздовж осей X, Y, Z.

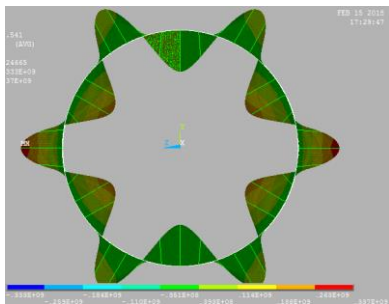


Рисунок 12. Розподіл нормальних напружень σ_y

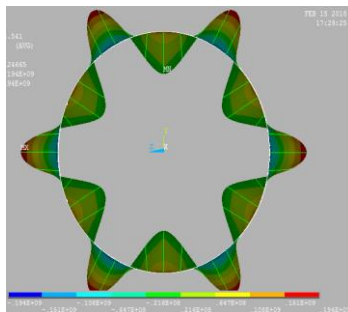


Рисунок 13. Розподіл нормальних напружень σ_x

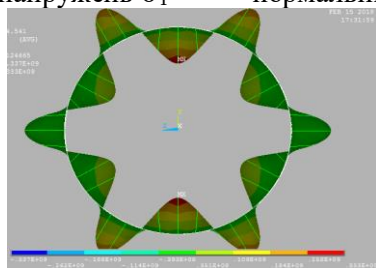


Рисунок 14. Розподіл нормальних напружень вздовж осі σ_z

Як помітно з рис. 15 - 17 максимальні нормальні напруження знаходяться на вершинах поперечних та поздовжніх хвиль.

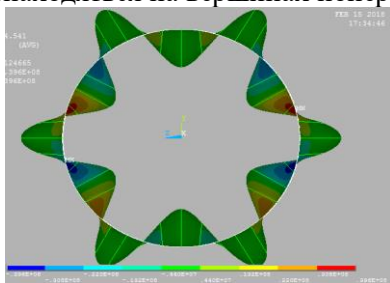


Рисунок 15. Розподіл дотичних напружень τ_{xy}

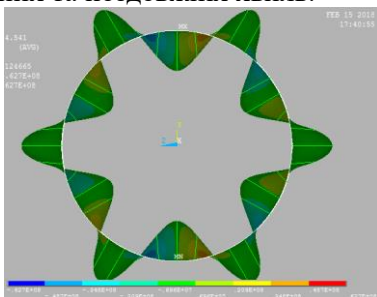


Рисунок 16. Розподіл дотичних напружень τ_{xz}

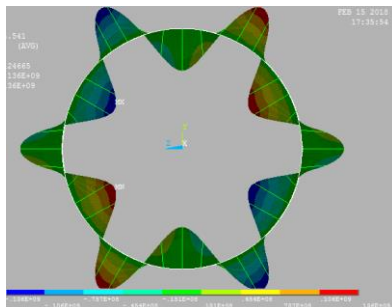


Рисунок 17. Розподіл дотичних напружень τ_{yz}

На відміну від нормальних напружень (рис. 15 - 17), та дотичних напружень (рис. 17) місцями концентрації дотичних напружень τ_{yz} (рис. 16-17), є місця зміни напрямку переміщень хвиль. Максимальні значення напружень в тонкостінній підсиленій циліндричній оболонці при коливаннях з частотою 14,2 Гц: $\sigma_x=194,2$ МПа; $\sigma_y=337,8$ МПа; $\sigma_z=333,1$ МПа; $\tau_{xy}=396,4$ МПа; $\tau_{yz}=136,4$ МПа; $\tau_{xz}=62,7$ МПа.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Вирішена важлива наукова задача підвищення надійності довгомірних циліндричних оболонок при транспортуванні на основі виявлення основних закономірностей впливу на НДС і власні частоти модельної підсиленої оболонки та зводяться до наступного:

1.3 використанням модального аналізу МСЕ досліджено власні частоти та форми коливань гладкої оболонки – моделі першої ступені ракети-носія.

2. За результатами модального аналізу отримані значення власних частот циліндричної підсиленої стрингерами тонкостінної модельної конструкції першої ступені ракети носія. Виявлено, що власні частоти модельної конструкції перевищують на декілька порядків значення власних коливань взятої за основу першої ступені РН.

3. Розроблено математичну модель циліндричної тонкостінної гладкої оболонки, на основі якої визначено частоти власних коливань непідсиленої циліндричної оболонки. Показано добру узгодженість результатів аналітичного і чисельного розрахунків власних частот коливань оболонки.

4. Виявлено, що із збільшенням площі поперечного перерізу стрингерів спостерігається зниження частот власних коливань підсиленого циліндра. Зокрема із збільшення площі поперечного перерізу на ділянці перших 40 мод зменшуються приблизно на 5 Гц.

При подальшому розгляді на проміжку від 41 до 100 моди різниця зростає до 15 Гц

5. Розроблено методологію експериментальних досліджень вимушених коливань підсиленої стрингерами циліндричної оболонки на базі сервогідравлічної випробувальної машини СТМ-100.

6. Для зменшення значень частот власних коливань моделі до частот повнорозмірної оболонки запропоновано використовувати поліуретановий наповнювач із наступними фізико-механічними властивостями $\rho = 1,0 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$, $E = 1,6 \text{ МПа}$. Експериментальним шляхом досліджено параметри та амплітуду вимушених коливань підсиленої модельної оболонки з наповнювачем та без нього.

7. Чисельним методом досліджено НДС повнорозмірної підсиленої оболонки для великого числа мод при дії транспортних навантажень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1. Yasnii P., Pyndus Y., Hud M. Analysis of natural frequencies and shapes of stringer-stiffened cylindrical shells. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2016. Vol 83. №. 3. P. 7–15. **(індексується у Index Copernicus, Google Scholar)**

2. Yasnii, P.V., Mykhailishyn, M.S., Pyndus, Y.I. et al. Numerical Analysis of Natural Vibrations of Cylindrical Shells Made of Aluminum Alloy. *Mater Sci* 55, 502–508 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00331-2> **(індексується у SCOPUS)**

3. Yasnii P., Pyndus Y., Hud M. Methodology for the experimental research of reinforced cylindrical shell forced oscillations. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2017. Vol. 86. №. 2. P. 7–13. **(індексується у Index Copernicus, Google Scholar)**

4. Yasnii P., Pyndus Y., Hud M. (2020) Experimental study of forced oscillations affinity-shaped reinforced thin-walled cylinder model. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2020, Vol 100, № 4, P. 127–134. **індексується у Index Copernicus, Google Scholar)**

5. Ясний, П. В., Пиндус, Ю. І. і Гудь, М. І. (2020) «Аналіз напружено-деформованого стану підсиленої циліндричної оболонки при вільних поперечних коливаннях», *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4(77)), с. 41–49. [doi: 10.31471/1993-9973-2020-4\(77\)-41-49](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4(77)-41-49). **(індексується у Index Copernicus, Google Scholar)**

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Ясній П. В., Пиндус Ю. І., Гудь М. І. "Вплив площі поперечного перерізу підкріплюючих елементів на власні частоти підсиленої циліндричної оболонки." Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“ Тернопіль, 2016. Ч.1 С. 70-71.

7. Ясній П. В., Пиндус Ю. І., Гудь М. І. "Порівняльний аналіз частот підсилених та непідсилених циліндричних оболонок." Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“ Тернопіль, 2016. Ч.1 С. 72-73.

8. Ясній П. В., Пиндус Ю. І., Гудь М. І. "Методологія експериментального дослідження впливу спектру навантаження на поведінку і втомне пошкодження під час транспортування ракети носія." Праці V Міжнародної науково-технічної конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“ Тернопіль, 2017. С. 167-168.

9. Ясній П. В., Михайлишин М.С., Гудь М. І.. "Вплив конструктивних особливостей на власні частоти коливань підсиленої циліндричної оболонки." Праці V Міжнародної науково-технічної конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“ Тернопіль, 2017. С. 220-221.

10. Ясній П. В., Пиндус Ю. І., Гудь М. І. "Порівняльний аналіз частот власних коливань підкріпленої тонкостінної циліндричної оболонки та її афінно-подібної моделі Матеріали XIX-МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» Київ, 2018. С. 39.

11. Ясній П. В., Пиндус Ю. І., Гудь М. І. "Вплив фізико-механічних характеристик наповнювача на частоти власних коливань циліндричної моделі підсиленої оболонки." Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті) Тернопіль, 2018. С. 75-76.

12. Ясній П. В., Михайлишин М.С., Пиндус Ю. І., Гудь М. І. "Аналітичний розрахунок гладкої циліндричної оболонки." Праці VI Міжнародної науково-технічної конференції „Пошкодження

матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування “ Тернопіль, 2019. С. 194-197.

АНОТАЦІЯ

Гудь М.І. Оцінювання довговічності тонкостінних циліндричних оболонок при транспортуванні літаком. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

У дисертації розглянуто актуальну науково-технічну задачу з виявлення основних закономірностей впливу конструктивних особливостей на напружено – деформований стан і власні частоти модельної підсиленої оболонки при транспортуванні.

Досліджено власні частоти та форми коливань гладкої оболонки – моделі першої ступені РН. Розроблено математичну модель циліндричної тонкостінної гладкої оболонки, на основі якої визначено частоти власних коливань непідсиленої циліндричної оболонки. Розроблено методику експериментального дослідження і обґрунтовано геометричні та фізичні параметри моделі першої ступені РН у вигляді підсиленої циліндричної оболонки. Досліджено вплив конструктивних факторів на частоти власних коливань підсиленої циліндричної оболонки. Виявлено закономірності впливу власних частот на напружено-деформований стан модельної підсиленої циліндричної оболонки. Оцінено її довговічність.

Ключові слова: підсилена тонкостінна циліндрична оболонка, вимушені коливання, власні коливання, напружено-деформований стан, алюмінієвий сплав Д16АТ.

АННОТАЦИЯ

Гудь М.И. Оценка долговечности тонкостенных цилиндрических оболочек при транспортировке самолетом. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела. - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2021.

В диссертации рассмотрены актуальную научно-техническую задачу по выявлению основных закономерностей

влияния конструктивных особенностей на напряженно - деформированное состояние и собственные частоты модельной усиленной оболочки при транспортировке.

Исследована собственные частоты и формы колебаний гладкой оболочки - модели первой степени РН. Разработана математическая модель цилиндрической тонкостенной гладкой оболочки, на основе которой определены частоты собственных колебаний неусиленного цилиндрической оболочки. Разработана методика экспериментального исследования и обоснованно геометрические и физические параметры модели первой степени РН в виде усиленной цилиндрической оболочки. Исследовано влияние конструктивных факторов на частоты собственных колебаний усиленной цилиндрической оболочки. Выявлены закономерности влияния собственных частот на напряженно-деформированное состояние модельной усиленной цилиндрической оболочки. Оценена ее долговечность.

Ключевые слова: усиленная тонкостенная цилиндрическая оболочка, вынужденные колебания, собственные колебания, напряженно-деформированное состояние, алюминиевый сплав Д16АТ.

ANNOTATION

Hud M.I. Evaluation of the durability of thin-walled cylindrical shells during transportation by air. - Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 01.02.04 – mechanics of deformable solid. - Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

The dissertation deals with an urgent scientific and technical problem to identify the main patterns of the influence of design features on the stress-strain state and natural frequencies of a model reinforced shell during transportation.

Using the modal analysis by the finite element method, the natural frequencies and forms of oscillations of the smooth shell - the model of the first stage of the launch vehicle

The natural frequencies and modes of vibrations of a smooth shell, a model of the first degree of the LV, are investigated. A mathematical model of a cylindrical thin-walled smooth shell is developed, on the basis of which the frequencies of natural vibrations of an unreinforced cylindrical shell are determined. A method of experimental research and substantiated geometric and physical parameters of a model of the first degree of a launch vehicle in the form of a reinforced cylindrical shell have been developed.

A methodology for experimental studies of forced oscillations of a stringer-reinforced cylindrical shell based on the STM-100 servohydraulic test machine has been developed.

To reduce the values of the natural oscillation frequencies of the model to the frequencies of the full-size shell, it is proposed to use a polyurethane filler with the following physical and mechanical properties $\rho = 1.0 \cdot 10^3 \text{ N/m}^3$, $E = 1.6 \text{ MPa}$. The parameters and amplitude of forced oscillations of the reinforced model shell with and without filler were investigated experimentally. The use of filler allows you to build a model of a cylindrical shell with the characteristics of natural frequencies close to the full-size shell structure. This is important for substantiating the methods of experimental studies of forced and intrinsic oscillations and fatigue strength of such shells using large-scale small structures.

The stress-strain state of a full-size reinforced shell for a large number of modes under the action of transport loads was investigated by a numerical method.

The influence of design factors on the frequencies of natural vibrations of a reinforced cylindrical shell is investigated. The regularities of the influence of natural frequencies on the stress-strain state of the model reinforced cylindrical shell are revealed. Its durability is assessed.

Key words: reinforced thin-walled cylindrical shell, forced vibrations, natural vibrations, stress-strain state, aluminum alloy D16AT.