

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

ЗВЕРЕВА Тетяна Олексіївна

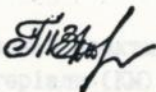
УДК 539.3

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
БАГАТОШАРОВИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОНОК ПРИ
ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 01.02.04 - МЕХАНІКА ДЕФОРМІВНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА

Автореферат

**дисертації на здобуття вченого ступеню
кандидата технічних наук**



К И Ї В 1993



00816971 (W)

№ 26.607

Робота виконана на кафедрі опору матеріалів і будівельної механіки Київського автомобільно-дорожнього інституту

Науковий керівник - доктор технічних наук,
професор В. Г. Піскунов

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,
професор М. В. Василенко
- кандидат технічних наук,
доцент В. І. Шваб'юк

Ведуча установа - Інститут проблем машинобудування
АН України, м. Харків

Захист дисертації відбудеться " 8 " ПРОТЯГО 1993 р.
о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.14.04
в Київському політехнічному інституті за адресою: 252056, Київ-56,
проспект Перемоги, 37. *ауд: 166*

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.

Автореферат розіслано " 6 " СІЧНЯ 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук,
доцент

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН УРСР

Є. Є. Оніщенко

АНОТАЦІЯ

Мета роботи полягає в розробці методики розрахунку багатшарових анізотропних конструкцій типу пологих оболонок та пластин при нестационарних динамічних навантаженнях, що базується на застосуванні уточненої моделі напружено-деформованого стану (НДС) і метода скінчених елементів (МСЕ).

В дисертаційній роботі вирішені наступні основні задачі:

- побудовано уточнену модель НДС багатшарових анізотропних пологих оболонок та пластин при нестационарних динамічних навантаженнях;

- на базі запропонованої моделі побудовано трикутний скінчений елемент (СЕ);

- розроблено та реалізовано методику розрахунку багатшарових конструкцій при динамічних діях;

- досліджено напружено-деформований стан і динамічні характеристики реальних конструкцій, що використовуються в машинобудуванні та будівництві.

На захист виносяться:

1. Розробка і обґрунтування уточненої моделі НДС багатшарових анізотропних конструкцій в умовах нестационарних навантажень.

2. Побудова і реалізація в межах обчислювального комплексу нового скінченного елемента для розрахунку багатшарових оболонок складної геометрії.

3. Обґрунтування достовірності результатів розрахунку на базі побудованого СЕ.

4. Результати дослідження НДС реальних багатшарових конструкцій при нестационарних динамічних навантаженнях.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасній практиці конструювання широко застосовуються композиційні матеріали (КМ), які мають властивості неоднакові в різних напрямках. Сполучення КМ і традиційних матеріалів дозволяє надавати необхідні фізико-механічні властивості конструктивним елементам. До них слід віднести анізотропні багатшарові оболонки і пластини, які мають високу міцність і жорсткість

при відносно малій масі, що відповідає сучасним вимогам машинобудування та будівництва. Неоднорідність параметрів таких конструктивних елементів, наявність шарів, що слабо опираються поперечним деформаціям, а також нестаціонарні динамічні навантаження у ряді випадків потребують застосування кінематичних моделей, що враховують ці особливості.

Розв'язання задач про напружено-деформований стан класу конструкцій, що розглядається, на основі тривимірних підходів пов'язано зі значними математичними труднощами. Використання уточнених двувимірних моделей НДС в сполученні з їх реалізацією чисельними методами дозволяє побудувати методіку розрахунку багат шарових конструкцій при нестаціонарних динамічних навантаженнях. Проблема створення таких моделей не є достатньо розробленою.

У зв'язку з цим, розвиток уточнених моделей розрахунку багат шарових анізотропних пологих оболонок та пластин при нестаціонарних динамічних діях, а також їх реалізацію ефективними чисельними методами слід розглядати як актуальну задачу механіки деформівного твердого тіла.

Наукова новизна роботи:

- побудована нова уточнена модель напружено-деформованого стану анізотропних конструкцій, що враховує весь комплекс фізико-механічних характеристик матеріалів шарів, деформації поперечного зсуву та динамічний характер навантаження;
- на основі введених гіпотез варіаційним шляхом отримано систему диференціальних рівнянь руху та відповідні граничні умови;
- побудовано і реалізовано новий трикутний скінченний елемент для розв'язання нестаціонарної задачі динаміки багат шарових анізотропних оболонок та пластин в уточненій постановці;
- встановлено характер впливу форми та тривалості дії нестаціонарного динамічного навантаження на НДС багат шарових оболонок;
- визначено особливості напружено-деформованого стану деяких реальних конструкцій, що застосовуються в машинобудуванні та будівництві, які виникають в умовах динамічного навантаження.

Достовірність результатів підтверджується зіставленням результатів, що отримані, з тривимірним розв'язком, розв'язками за альтернативними методиками і експериментальними даними, а також чисельним досліджуванням збігу результатів на основі МСЕ.

Практична цінність роботи полягає в можливості застосування розробленої методики розрахунку анізотропних пологих оболонок і пластин при конструванні широкого класу об'єктів машинобудування та будівництва.

Дисертація виконана в межах теми "Чисельне моделювання процесів деформування багат шарових елементів конструкцій та споруд, що взаємодіють з неоднорідними середовищами, при статичних, динамічних і температурних діях", яка розробляється на кафедрі опору матеріалів та будівельної механіки КАДІ по плану Міністерства освіти України.

Впровадження результатів. Частина матеріалів роботи використана при конструванні багат шарових систем в Київському зональному науково-дослідному інституті експериментального проектування Міністерства інвестицій та будівництва України і НВО "Прикладна механіка" (м. Красноярськ).

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на Уральській науково-технічній конференції "Геометричне моделювання і нарисна геометрія" (Пермь, 1988), Республіканській науково-технічній конференції "Ефективні чисельні методи розв'язку граничних задач механіки твердого деформівного тіла" (Харків, 1989), Міжвузівській науково-технічній конференції "Композиційні матеріали в конструкціях глибоководних технічних засобів" (Миколаїв, 1991), наукових конференціях КАДІ (1989 - 1992).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 4 роботи.

Структура і обсяг. Дисертація складається з введення, чотирьох глав, висновків, бібліографії (158 найменувань) і додатку. Основний зміст роботи викладений на 115 сторінках та включає 24 рисунки і 14 таблиць.

Автор висловлює щиро вдячність науковому керівникові професору В.Т.Піскунову.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У введенні обґрунтовано актуальність роботи, поставлені мета і задачі дисертації.

Подано короткий огляд теорій і методів розрахунку однорідних та багат шарових конструкцій при динамічних діях.

Питанням застосування класичної та уточнених теорій для ана-

лізу НДС багат шарових конструкцій присвячені роботи С. О. Амбарцумяна, А. Я. Александрова, М. А. Алфутова, В. В. Болотіна, А. Т. Василенка, Е. І. Григолька, Я. М. Григоренка, Б. Я. Кантора, Г. Б. Колчіна, С. Г. Лехницького, Ю. М. Новічкова, Н. Д. Панкратової, Б. Л. Пелеха, В. Г. Піскунова, А. В. Плеханова, О. О. Рассказова, О. Ф. Рябова, В. С. Саркисяна, Л. П. Хорошуна, В. К. Чибірякова та інших вчених.

Відзначається, що в задачах статки та динаміки однорідних та багат шарових конструкцій завдяки роботам Д. Аргеріса, К. Ю. Бате і Ед. А. Вілсона, М. В. Василенка, О. К. Зенкевича, Д. Одена, В. Г. Піскунова, О. О. Рассказова, Р. Б. Рікардса, Л. О. Розіна, О. С. Сахарова та інших досліджувачів, отримали широке застосування чисельні методи, зокрема метод скінчених елементів. Але в нестационарній задачі динаміки багат шарових анізотропних оболонок даний метод не знайшов ще достатнього розвитку та застосування.

Аналіз літературних джерел показав, що питання розв'язання нестационарної задачі динаміки багат шарових анізотропних конструкцій розроблені також не в повній мірі. Моделі НДС і закладені в їх основу гіпотези потребують вдосконалення щодо врахування динамічних факторів, необхідно також орієнтуватися на реалізацію побудованої моделі ефективним чисельним методом - МСЕ. На цій основі сформульована мета роботи, яку наведено вище.

Далі описано об'єкт дослідження - оболонку постійної товщини h , яка зібрана з довільного числа анізотропних шарів, що мають од-

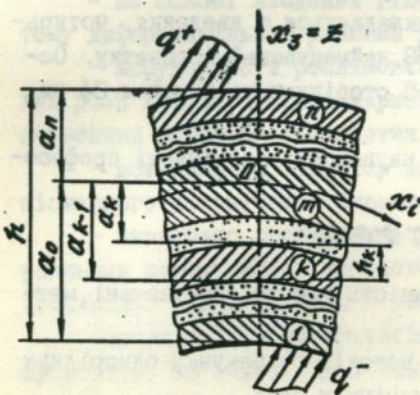


Рис. 1

ну площину пружної симетрії, і віднесена до ортогональної системи криволінійних координат $Ox_1x_2x_3$ (рис. 1). Координатні лінії Ox_1 , Ox_2 збігаються з лініями головних кривин координатної поверхні $x_3 = z = 0$. Фізико-механічні характеристики матеріалів шарів є функціями z ($a_{k-1} \leq z \leq a_k$; $k = 1, 2, \dots, n$) і можуть суттєво відрізнятися. Порядок розташування шарів у пакеті довільний, між шарами виконуються умови ідеального механічного контакту. Оболонка

приймається досить пологою, головні кривини і кривина крутіння координатної поверхні вважаються сталими. Загальна товщина пакету шарів мала відносно радіусів кривини. Диференціювання по відповідній координаті означається комою на рівні нижніх індексів, а похідна по часу - крапкою над функцією. Введено підсумовування по "німим" індексам i, j, p, s ; по k, r, m - підсумовування немає.

Розроблено нову уточнену модель НДС багат шарових конструкцій. На зовнішніх поверхнях оболонки задані вектори навантаження, що представлені проєкціями поверхневих навантажень $q_{\mu}^{-} = q_{\mu}^{-}(x_i, a_0, \tau)$ та $q_{\mu}^{+} = q_{\mu}^{+}(x_i, a_n, \tau)$ на координатні лінії Ox_{μ} ($\mu = 1, 2, 3$; $i = 1, 2$). Співвідношення виведені в два етапи. На першому етапі використано гіпотези класичної теорії ($\epsilon_{\mu\alpha} = 0$; $\sigma_{\mu\alpha} = 0$). Шляхом інтегрування рівнянь руху тривимірної теорії пружності та задовільнення умовам контакту шарів, а також умовам на зовнішніх поверхнях отримані вирази для поперечних дотичних напружень в k -ому шарі

$$\sigma_{i3} = w_{,111} f_{11} + w_{,112} f_{12} + w_{,221} f_{13} + w_{,222} f_{14} + \bar{w}_{,i} f_{r\alpha} + \sigma_{i3q}, \quad (i = r = 1, 2). \quad (1)$$

Тут $w(x_i, \tau)$ - нормальні переміщення на рівні координатної поверхні; σ_{i3q} - складові, що враховують вплив дотичних навантажень;

$f_{i\alpha} = f_{i\alpha}^z(z)$ - неперервні функції, що мають вигляд

$$f_{11} = \varphi_{11} - R_{11} Y_{11}; \quad f_{12} = 3f_{21};$$

$$f_{13} = \varphi_{12} - R_{12} Y_{12} + 2(\varphi_{\alpha\alpha} - R_{\alpha\alpha} Y_{\alpha\alpha});$$

$$f_{14} = \varphi_{2\alpha} - R_{2\alpha} Y_{2\alpha}; \quad f_{21} = \varphi_{1\alpha} - R_{1\alpha} Y_{1\alpha};$$

$$f_{22} = f_{13}; \quad f_{23} = 3f_{14};$$

$$f_{24} = \varphi_{22} - R_{22} Y_{22}; \quad f_{1\alpha} = \bar{R}_1 \bar{Y}_1 - \bar{\varphi}_1.$$

$$\varphi_{1j} = \int_{a_0}^z B_{1j} z dz; \quad Y_{1j} = C_{rm}^{-1} \int_{a_0}^z B_{1j} dz;$$

$$\bar{p}_i = \int_{a_0}^z \rho_i z dz; \quad \bar{Y}_i = \bar{C}_i^{-1} \int_{a_0}^z \rho_r dz;$$

$$(C_{ij}, R_{ij}) = \int_{a_0}^{a_n} B_{ij}(1, z) dz; \quad (\bar{C}_i, \bar{R}_i) = \int_{a_0}^{a_n} \rho_r(1, z) dz;$$

$$(i, j = 1, 2; r = i; m = j), \quad (2)$$

де $B_{\Gamma m} = B_{\Gamma m}(z)$ - коефіцієнти тензору жорсткостей, $\rho_i = \rho_i(z)$ - густина матеріалу k -го шару.

На другому етапі на основі виразу (1)-та закону Гука прийнята гіпотеза для деформацій поперечного зсуву в k -ому шарі

$$2e_{i3} = \chi_p \alpha_{ip} + e_{i3q}. \quad (i = 1, 2; p = 1 \dots 6). \quad (3)$$

Тут введені нові незалежні функції зсуву $\chi_p = \chi_p(x_1, \tau)$ в такій відповідності:

$$[w_{,111}; w_{,112}; w_{,221}; w_{,222}; \ddot{w}_{,1}; \ddot{w}_{,2}] \Rightarrow$$

$$\rightarrow [\chi_1; \chi_2; \chi_3; \chi_4; \chi_5; \chi_6]; \quad (4)$$

$\alpha_{ip} = \alpha_{ip}(z)$ - задані функції розподілу. На відміну від відомих гіпотеза (3) враховує динамічний характер процесу (функції χ_p, χ_q).

На базі виразу (3) і співвідношень Коши отримані наступні кінематичні співвідношення:

$$u_1 = v_1 - w_{,1}z - \chi_p \psi_{ip} - u_{iq}; \quad u_3 = w, \quad (5)$$

де $v_1 = v_1(x_j, \tau)$ - тангенціальні переміщення координатної поверхні;

$$\psi_{ip} = \psi_{ip}(z) = - \int_0^z \alpha_{ip} dz, \quad (i, j = 1, 2; p = 1 \dots 6) \quad (6)$$

- задані нелінійні функції; u_{iq} - складові, що враховують вплив тангенціальних навантажень на зовнішніх поверхнях оболонки.

Компоненти тензора напружень визначаються із співвідношень узагальненого закону Гука.

На основі варіаційного принципу Остроградського-Гамільтона виведено систему диференціальних рівнянь руху в зусиллях

$$U_{i-} - N_{i,j,j} - q_i^+ - q_i^- = 0; \quad (i, j = 1, 2; \quad r = i; \quad s = 1 \dots 6);$$

$$U_{i,r,i} + U_s - M_{i,j,i,j} + k_{ij} N_{i,j} - q_{i,i}^+ a_n - q_{i,i}^- a_n - q_s = 0;$$

$$N_{i,j,j}^{(i,s)} + Q_{i,s}^{(i,s)} - U_i^{(i,s)} + q_i^+ \psi_{i,s}^{(n)}(a_n) + q_i^- \psi_{i,s}^{(i)}(a_0) = 0 \quad (7)$$

та відповідні граничні умови. Після представлення (7) в формі метода переміщень загальний порядок системи дорівнює двадцяти і не залежить від кількості шарів. На кожній границі оболонки повинно бути задовільнено по десять граничних умов. Граничні умови розділено на дві групи. Перша група відповідає умовам класичної теорії, умови другої групи, які пов'язані з врахуванням деформацій попереочного зсуву, інтерпретовано по аналогії з відомими роботами у вигляді різного роду діафрагм на торцях оболонки.

При трансверсальній ізотропії чи ізотропії матеріалів всіх шарів загальний порядок системи знижується до шістнадцяти. В випадку осесиметричної задачі загальний порядок дорівнює десяти.

Отримано аналітичний розв'язок задачі вільних коливань прямокутних ортотропних багат шарових оболонок, на контурі яких виконуються умови типу Нав'є. Достовірність розв'язку, що побудовано, обгрунтовано зіставленням з відомими в літературі тривимірними розв'язками.

Спочатку результати зрівнювалися з тривимірним розв'язком А. Нура для дво-, чотири-, шести- та десятишарових квадратних пластин ($a/h = 5$). Кожний шар - композиційний матеріал з наступними характеристиками: $E_1 = \beta E_2$; $G_{12} = G_{13} = 0,6E_2$; $G_{23} = 0,5E_2$; $\nu_{21} = 0,25$, де β - ступінь ортотропії. Шари орієнтовані по черзі під кутами 0° та 90° до осі Ox_1 і мають однакову товщину. Безрозмірні власні частоти представлено в таблиці 1, де КТП - розв'язок на базі класичної теорії пластин.

Для тришарової ізотропної пластинки власні частоти зіставлялися з розв'язком на основі тривимірного підходу, запропонованого В. Г. Піскуновим (таблиця 2). Підтверджено, що результати розв'язку на базі моделі типу С. П. Тимошенка зі збільшенням хвильових чисел практично не змінюються і суттєво відрізняються від тривимірного розв'язку. Розв'язок задачі в межах класичної теорії в даному випадку є неприпустимим навіть для нижчих частот.

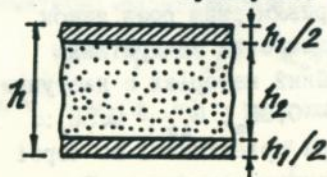
Таблиця 1

Вплив ступеню ортотропії окремих шарів на безрозмірну основну частоту $\bar{\omega} = \omega (\rho h^2 / E_2)^{-1/2}$ антисиметричних пластин

Кількість шарів	Рішення	E_1 / E_2				
		3	10	20	30	40
2	Тривимірне Пропоноване КТП	0.2503	0.2794	0.3094	0.3271	0.3425
		0.2486	0.2777	0.3053	0.3253	0.3407
		0.2708	0.3097	0.3542	0.3934	0.4288
6	Тривимірне Пропоноване КТП	0.2644	0.3366	0.3936	0.4278	0.4509
		0.2618	0.3335	0.3902	0.4243	0.4473
		0.2897	0.4022	0.5523	0.6196	0.7036
10	Тривимірне Пропоноване КТП	0.2658	0.3425	0.4034	0.4401	0.4650
		0.2631	0.3392	0.3997	0.4363	0.4612
		0.2912	0.4089	0.5340	0.6349	0.7218

Таблиця 2

Безрозмірні власні частоти $\bar{\omega} = 100\omega \frac{L}{\pi} \left(\frac{\rho_2}{2G_2} \right)^{-1/2}$
тришарової ізотропної пластини.



$$a_1 = a_2 = 40h; \quad L = a_1 / m = a_2 / l;$$

$$G_1 = 10^3 G_2; \quad \rho_1 = 10\rho_2;$$

$$\nu_1 = 0.3; \quad \nu_2 = 0; \quad h_2 = 9h_1$$

Вид теорії	Хвильове число $m = l$				
	1	5	10	20	40
Тривимірна	48.270	71.414	74.565	81.792	100.00
Пропонована	48.364	71.555	74.820	82.503	106.95
Типу С. П. Тімошенка	48.356	70.938	72.252	72.591	72.677
Класична теорія	64.728	316.66	-	-	-

Крім того, частоти власних коливань тришарової пластини із трансверсально-ізотропним легким заповнювачем добре узгоджуються з експериментальними даними О.О.Рассказова.

Розроблено чисельну методику розв'язку нестационарної задачі динаміки методом скінченних елементів. Розглянуто частку багат шарової оболонки, яка ототожнюється з областю скінченного елемента. Варіацію функціоналу повної енергії γ -го СЕ представлено у вигляді

$$\begin{aligned} \delta U_{\gamma} = & \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_{S_{\gamma}} \left\{ \left([A] [L_1] \langle V \rangle_{\gamma} - \langle \sigma_Q \rangle_{\gamma} \right) \delta \left([L_1] \langle V \rangle_{\gamma} \right)^T - \right. \\ & - \left([P] [L_2] \langle \ddot{V} \rangle_{\gamma} - \langle U_Q \rangle_{\gamma} \right) \delta \left([L_2] \langle V \rangle_{\gamma} \right)^T - \\ & \left. - [Q] \langle q \rangle_{\gamma} \delta \left([L_2] \langle V \rangle_{\gamma} \right)^T \right\} dS_{\gamma} dt, \end{aligned} \quad (8)$$

де $[L_1], [L_2]$ - матриці диференціальних операторів; $[A], [P]$ - матриці пружності та густини; $\langle V \rangle_{\gamma} = \langle v_1, w, \chi_p \rangle^T$, ($i = 1, 2$; $p = 1 \dots 6$) - вектор узагальнених переміщень координатної поверхні; $\langle \sigma_Q \rangle_{\gamma}$, $\langle U_Q \rangle_{\gamma}$ - відповідно компоненти векторів напружень та сил інерції, які враховують вплив дотичних навантажень на зовнішніх оболонки; $\langle q \rangle_{\gamma}$ - вектор поверхневих навантажень; $[Q]$ - матриця зв'язку між векторами $\langle q \rangle_{\gamma}$ та переміщеннями точок зовнішніх поверхонь γ -го СЕ.

Побудовано новий плоский трикутний скінченний елемент багат шарової анізотропної оболонки (рис.3). Вектор вузлових переміщень в загальній системі координат має вигляд

$$\langle V \rangle_{\gamma} = \langle v_{1j}, w_j, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j, v_{1j}^{(s)}, w_j^{(s)} \rangle_{\gamma}^T. \quad (9)$$

Тут v_{1j}, w_j - переміщення j -го вузла ($j = 1, 2, 3$) в напрямках осей Ox_1, Oz ; $\alpha_j = w_{,2}, \beta_j = -w_{,1}, \gamma_j$ - кути повороту відносно осей Ox_1, Oz ; $v_{1j}^{(s)}$ - узагальнені переміщення, що моделюють зсуви в напрямках осей Ox_1 ; $w_j^{(s)}$ - узагальнені переміщення в напрямку осі Oz ($i = 1, 2$; $s = 1, 2, 3$). Ступені свободи $\gamma_j, w_j^{(s)}$ необхідні для врахування просторової роботи конструкції при стикуванні елементів, що розташовані в різних площинах, і в місцевій системі координат дорівнюють нулеві.

Узагальнені переміщення v_1, χ_p по області СЕ апроксимуються

лінійними функціями трикутного елемента для плоского напруженого стану, а нормальні переміщення w - системою функцій, що запропонована В. С. Карпіловським.

Матриці жорсткості і мас r -го СЕ представлено в формі

$$[K]_r = [K_{ij}]_r; [M]_r = [M_{ij}]_r, (i, j = 1 \dots 45), \quad (10)$$

$$\text{де } K_{ij} = \int_{S_r} [L_1] \langle \Phi_i \rangle [A] \left([L_1] \langle \Phi_j \rangle \right)^T dS_r;$$

$$M_{ij} = \int_{S_r} [L_2] \langle \Phi_i \rangle [P] \left([L_2] \langle \Phi_j \rangle \right)^T dS_r. \quad (11)$$

Матриці жорсткості і мас мають блокову структуру $[K]_r = [K_{\mu t}]_r$; $[M]_r = [M_{\mu t}]_r$, $(\mu, t = 1, 2, 3)$. Блоки $[K_{\mu\mu}]$, $[M_{\mu\mu}]$ описують відповідно плоский напружений стан, стани згину та зсуву, а блоки $[K_{\mu t}]$, $[M_{\mu t}]$ $(\mu \neq t)$ - взаємодія цих станів.

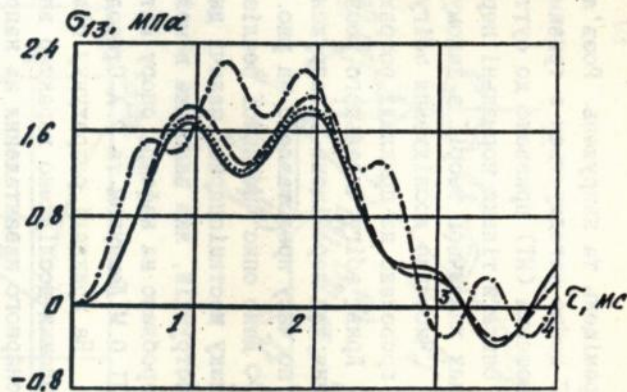
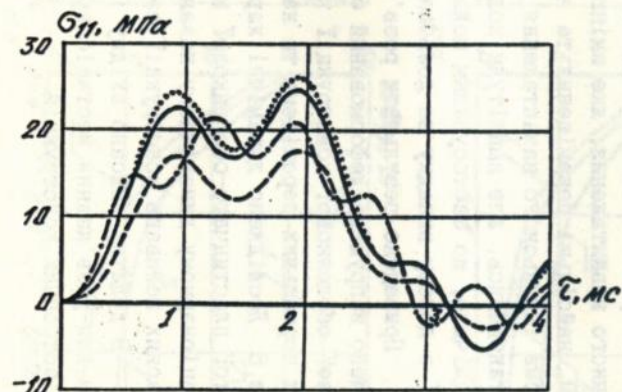
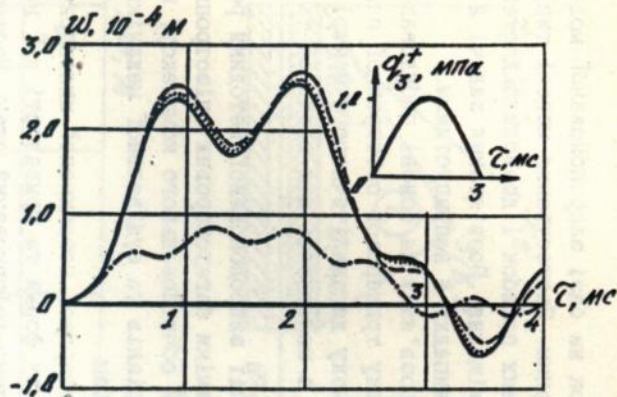
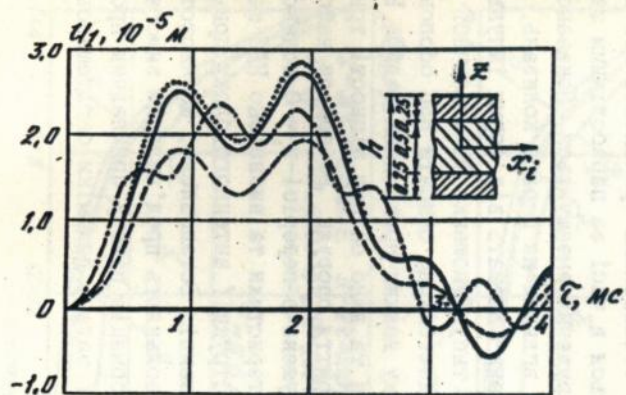
Вектор приведених вузлових сил записано у вигляді

$$[F]_r = [F_1]_r; (1 = 1 \dots 45), \quad (12)$$

$$\text{де } F_1 = \int_{S_r} \langle \sigma_Q \rangle_r \left([L_1] \langle \Phi_1 \rangle \right)^T dS_r - \int_{S_r} \left(\langle U_Q \rangle_r - [Q] \langle q \rangle_r \right) \left([L_2] \langle \Phi_1 \rangle \right)^T dS. \quad (13)$$

Для чисельного інтегрування по часу системи рівнянь МСЕ використано безумовно стійкий метод Ньюмарка. Розглянуто скінченно-елементні аналоги відповідних граничних умов.

Достовірність запропонованого підходу обґрунтовано зіставленням результатів розрахунку тришарової квадратної пластини $(a/h = 6; h = 0,1 \text{ м})$ з тривимірним скінченно-елементним розв'язком. На торцях пластини завдано граничні умови типу Нав'є. До верхньої поверхні пластини прикладено нормальне навантаження, яке змінюється за законом синусів, а в часі за параболічним законом. Кожний шар є композиційним матеріалом, що армовано однонаправленими волокнами, з наступними характеристиками: $E_1/E_2 = 25$; $E_3 = E_2$; $E_2/G_{13} = 2$; $E_2/G_{23} = 5$; $G_{12} = G_{13}$; $\nu_{21} = \nu_{31} = \nu_{23} = 0,25$; $E_2 = 6900 \text{ МПа}$; $\rho = 1450 \text{ кг/м}^3$. Шари орієнтовано по черзі під кутами 0° та 90° відносно осі Ox_1 . На рис. 2 представлено розподіли в часі найбільших



— ТРИВІСІРНИЙ РОЗВ'ЯЗОК; ПРОЛОКОВАНИЙ; - - - - - ЖТ; - · - · - КТЛ

Рис. 2

перемішень та напружень. Розв'язок на базі запропонованої моделі НДС добре узгоджується з тривимірним. Застосування моделі типу Тимошенка (МТ) призвело до суттєвих похибок і дозволило достовірно описати тільки нормальні переміщення. Розв'язання задачі в межах класичної теорії в даному випадку є неприпустимим.

Чисельне дослідження збігу розв'язку на основі побудованого СЕ проведено на прикладі розрахунку тришарової ортотропної пластини. Криві збігу чисельного розв'язку до аналітичного у центрі пластини для перемішень і напружень в залежності від сітки СЕ та кроку по часу представлено на рис. 4.

Дано опис чисельної реалізації запропонованої методики розв'язку нестационарної задачі динаміки багатшарових анізотропних конструкцій, яка виконана в межах обчислювального комплексу, що розроблено на кафедрі опору матеріалів та будівельної механіки КАДІ О. М. Демчуком та Р. А. Стародубом.

На прикладі розрахунку п'ятишарової незамкненої циліндричної оболонки досліджено характер впливу форми та тривалості дії нестационарного навантаження на напружено-деформований стан. Частоти власних поперечних коливань в залежності від кривини оболонки подано на рис. 5. Встановлено, що із збільшенням тривалості дії динамічного навантаження, яке змінюється в часі за параболічним законом, найбільші переміщення та напруження зменшуються. Показано, що форма імпульсного навантаження не впливає на період коливань, які установились, але амплітуди коливань залежать від форми імпульсу. Відмічено, що застосування моделі типу Тимошенка та класичної теорії в даному випадку не дозволяє достовірно описати НДС оболонки.

Приведено результати розв'язку деяких прикладних задач. Визначено напружено-деформований стан та дано оцінку міцності тришарової оболонкової конструкції покриття споруди. Розподіли найбільших нормальних перемішень та напружень в перерізі $x_1 = 0$ подано на рис. 6. Досліджено динамічні характеристики та визначено НДС шаруватої пластинчато-оболонкової конструкції антенного блоку при нестационарному динамічному навантаженні. Встановлено, що частоти власних коливань конструкції задовольняють пред'явленим вимогам.

В додатку описано вхідну інформацію пакету прикладних програм для розв'язання нестационарної задачі динаміки багатшарових анізотропних конструкцій.

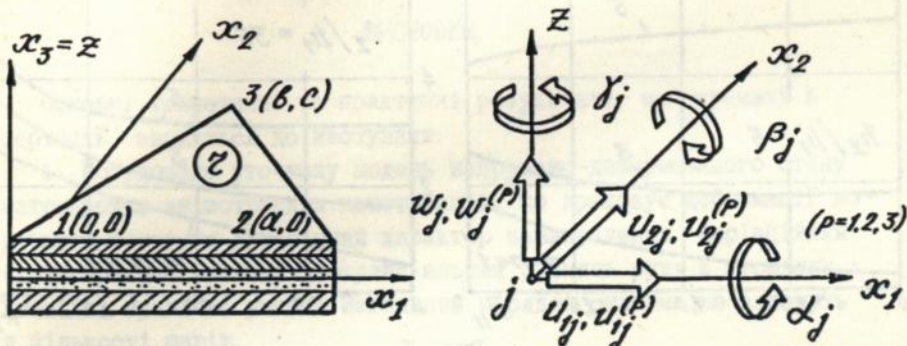


Рис. 3

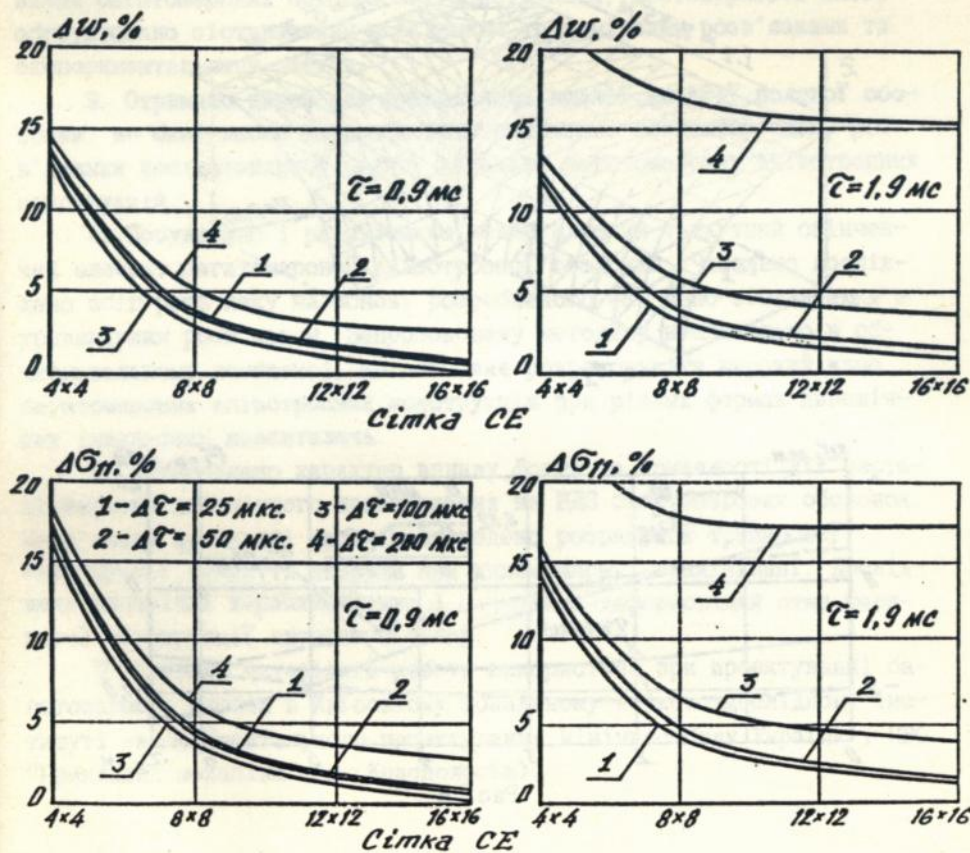


Рис. 4

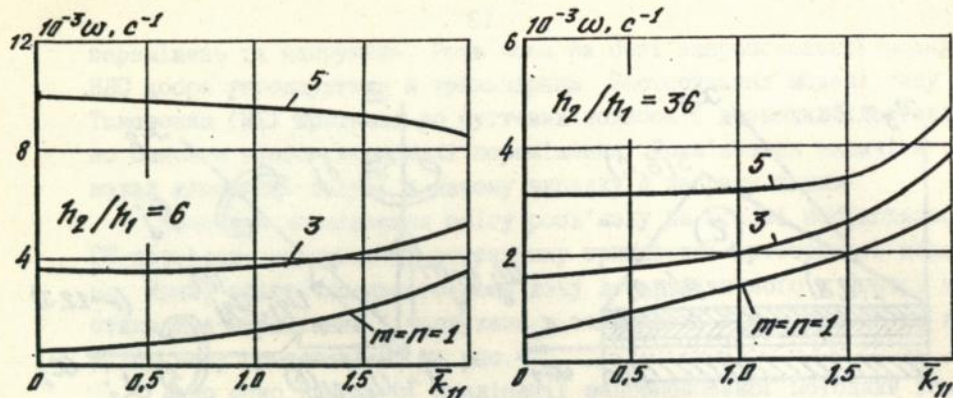


Рис. 5

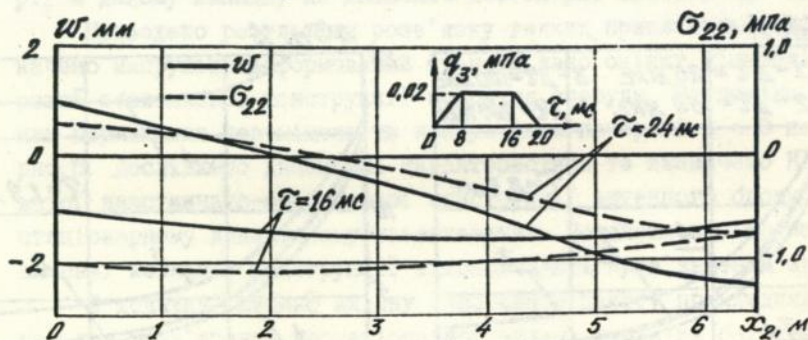
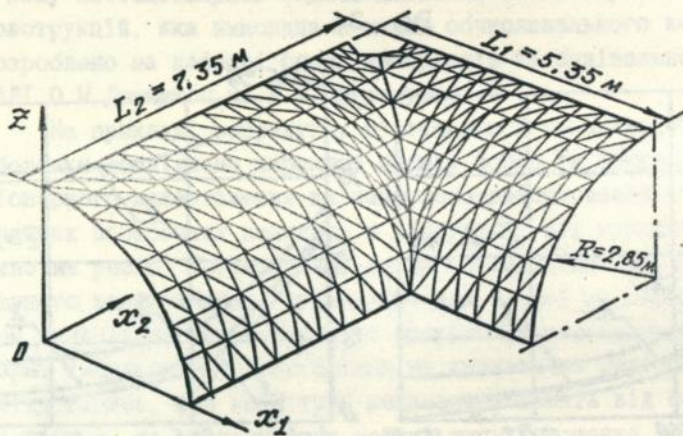


Рис. 6

ВИСНОВКИ

Основні теоретичні та практичні результати, що отримані в дисертації, зводяться до наступних:

1. Побудовано уточнену модель напружено-деформованого стану багат шарових анізотропних конструкцій, що враховує деформації поперечного зсуву та динамічний характер навантаження. Варіаційним шляхом отримано систему диференціальних рівнянь руху в зусиллях і відповідні граничні умови. Загальний порядок системи не залежить від кількості шарів.

2. Розроблено аналітичний розв'язок задачі про власні коливання багат шарових ортотропних конструкцій, достовірність якого обґрунтовано зіставленням з відомими тривимірними розв'язками та експериментальними даними.

3. Отримано вираз для функціонала повної енергії пологої оболонки, на базі якого запропоновано скінченно-елементну схему розв'язання нестационарної задачі динаміки багат шарових анізотропних конструкцій.

4. Побудовано і реалізовано новий плоский трикутний скінченний елемент багат шарової анізотропної оболонки. Чисельно досліджено збіг розв'язку на основі розробленого СЕ. Дано зіставлення з тривимірним розв'язком. Запропоновану методику реалізовано в обчислювальному комплексі, що дозволяє розраховувати широкий клас багат шарових анізотропних конструкцій при різних формах динамічних імпульсних навантажень.

5. Встановлено характер впливу форми та тривалості дії нестационарного динамічного навантаження на НДС багат шарових оболонок. Розв'язано прикладні задачі. Проведено розрахунок тришарової конструкції покриття споруди при динамічному навантаженні. Досліджено динамічні характеристики і напружено-деформований стан шаруватої конструкції антенного блоку.

6. Частина матеріалів роботи використана при проектуванні багат шарових систем в Київському зональному науково-дослідному інституті експериментального проектування Мінінвестбуду України і НВО "Прикладна механіка" (м. Красноярськ).

Зміст дисертації відображено в публікаціях:

1. Квазирегулярная дискретизация композитных конструкций в прочностных расчетах и их графическая интерпретация//Тез. докладов Уральской научно-технической конференции "Геометрическое моделирование и начертательная геометрия". - Пермь. - 1988. - С. 118 (співавтори Піскунов В.Г., Веріженко В.Є.).
2. Исследование на ЭВМ быстропротекающих процессов в неоднородных слоистых оболочках//Тез. докладов Республиканской научно-технической конференции "Эффективные численные методы решения краевых задач механики твердого деформируемого тела". - Харків: ХІСІ. - 1989. - С. 76 - 77 (співавтор Піскунов В.Г.).
3. Численное исследование быстропротекающих процессов в слоистых пологих оболочках//Сопротивление материалов и теория сооружений. - К.: Будівельник. - 1991. - Вип. 59. - С. 14 - 19 (співавтор Піскунов В.Г.).
4. Об одном подходе к решению задачи изгиба многослойных композитных пластин при импульсном нагружении//Тез. докладов межвузовской научно-технической конференции "Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических средств". - Миколаїв. - 1991. С. 130 - 131 (співавтори Присяжнюк В.К., Табаков П.Я.).



Підписано до друк. 29.12.92. Формат 60x84 1/16
Обсяг 1,0 друк. лист. Замовл. N 1054. Тираж 100

НДІ "КВАНТ"

АВ 26.601

Тема диссертации и изображения

1. Квазирегуляризация дискретных

прочностных расчетах и их графическая интерпретация // Тез. докладов Уральской научно-технической конференции "Технологические моделирование и вычислительная геометрия". - Пермь. - 1989. - С. 116 (составитель Пискунов В.Г., Веринский В.С.)

2. Возмущение на IBM быстропотоковых процессов в многослойных оболочках // Тез. докладов Государственной научно-технической конференции "Эффективные численные методы решения краевых задач механики твердого деформируемого тела". - Киев: НТСТ. - 1989. - С. 76 - 77 (составитель Пискунов В.Г.)

3. Численное исследование быстропотоковых процессов в оболочках // Вычислительные алгоритмы и теория сооружений. - К.: Будівельник. - 1991. - Вып. 92. - С. 14 - 18 (составитель Пискунов В.Г.)

4. Об одной задаче в решении задачи задачи многослойных комплексов элементов при изгибной нагрузке // Тез. докладов международной научно-технической конференции "Компьютерные технологии в конструировании гидротехнических сооружений". - Москва: ИГиЛ. - 1991. - С. 130 - 131 (составитель Пискунов В.Г., Тарасов В.С.)

Получено по адресу: 59 15 95 - Пермь, ул. Гайдара, 100
Обрат. 1.0 руб. Индекс: 420014

ИЛИ "КВАНТ" ИЛИ