

6. Каганов И.Л. Ионные приборы / Каганов И.Л. – М. : Энергия, 1972. – 528 с.
7. Френсис Г. Ионизационные явления в газах / Френсис Г. – М. : Атомиздат, 1964. – 179 с.
8. Пастух І.М. Проблематика моделювання процесу азотування в тліючому розряді / І.М. Пастух, О.С. Здибель // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2005. – № 1. – С. 7–11.
9. Об азотировании анода в тлеющем разряде. Электронная обработка материалов / [Крейндель Ю.Е., Пономарева Л.П., Пономарев В.П., Слосман А.И.]. – 1984. – № 4. – С. 32–34.
10. Дуплексная обработка инструментальных сталей в вакууме / А.А. Андреев, В.В. Кунченко, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении: Сб. докл. второго Международного симпозиума ОТТОМ-2. – Харьков, 2001. С. 48–56.
11. Нагрев материалов потоками электронов из плазмы вакуумно-дугового разряда с холодным катодом / Л.П. Саблев, А.А. Андреев, Р.И. Ступак, В.М. Шулаев // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении: Сб. докл. 3-й Международной конференции ОТТОМ-3. – Харьков, 2002. С. 38–44.
12. Герасимов С.М. Физические основы электронной техники / Герасимов С.М., Белан М.В., Москалюк В.А. – К. : Вища школа, 1081. – 368 с.

Надійшла 17.12.2011 р.

Статтю представляє: д.т.н. Пастух І.М.

УДК. 539.3

М.Г. СУР'ЯНИКОВ, Г.М. КОЗОЛУП

Одеський національний політехнічний університет

Г.Б. ПАРАСКА

Хмельницький національний університет

ДОДАТОК МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДО РОЗРАХУНКУ РЕБРИСТИХ ПЛАСТИН

Розглянуто метод граничних елементів до розрахунку ребристих пластин. Побудовано фундаментальні функції, функції Гріна і виконано формування векторів зовнішніх навантажень.

The method of boundary elements in the calculation of ribbed plates. We construct the fundamental features of the Grien function and written form vectors of external loads.

Ключові слова: метод граничних елементів.

Вступ

Ребриста пластина являє собою сполучення взаємодіючих при деформації елементів — власне пластини і ребер (одномірних стрижнів). Напружено-деформований стан кожного з цих елементів, обумовлений у рамках відомих прикладних теорій, має свої особливості. У зв'язку з цим при вивченні ребристих пластин виникає необхідність побудови спеціальної теорії, що враховує основні особливості, властиві окремим елементам, і умови їхньої спільної роботи. Представляється, що для розв'язання цієї задачі може виявитися ефективним чисельно-аналітичний метод граничних елементів [1, 2].

Метод дослідження

Диференційне рівняння вигину пластинки при наявності ребер має вид [3]

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{\bar{q}}{D}, \quad (1)$$

де $W = W(x, y)$ – прогин пластинки; $\bar{q} = \bar{q}(x, y)$ – вільний член рівняння, що враховує не тільки зовнішні навантаження, але і наявність підкріплювальних ребер у подовжньому напрямку, під яким будемо розуміти напрямку, рівнобіжний осі y (рис. 1).

Шляхом застосування для (1) методу Канторовича-Власова ця двомірна задача може бути зведена до одномірної, як того потребує загальна концепція методу граничних елементів [2].

Тоді прогин точки серединної площини пластини буде

$$W(x, y) = W(y)X(x), \quad (2)$$

де $X(x)$ — функція поперечного розподілу прогинів пластини, яка має точно описувати форму вигнутої поверхні пластини в напрямку осі x . Цій вимозі повною мірою задовольняють криві прогину балки, що має такі ж умови обпирання, як і пластина, у напрямку осі x .

Існують два способи для вибору цієї функції: статичний і динамічний [2]. При статичному способі прогин балки визначається прикладеним до неї статичним навантаженням (рис. 2). При динамічному способі прогини балки виражаються її формами власних коливань (рис. 3).

Підставимо (2) в (1) і у відомі з теорії вигину пластин вираження статичних параметрів (згинальних моментів і приведених поперечних сил). Множачи потім обидві частини кожного вираження на $X(x)$ й інтегруючи в межах $[0; l_1]$, одержимо задачу Коші одномірної моделі вигину прямокутної пластини,

підкріпленої подовжніми ребрами:

$$W^{IV}(y) - 2r^2W''(y) + s^4W(y) = \frac{\bar{q}(y)}{D} \quad (3)$$

за початкових умов

$$DW(0); Dq(0) = DW'(0); M(0) = -D\bar{A}[W''(0) - mr^2W(0)];$$

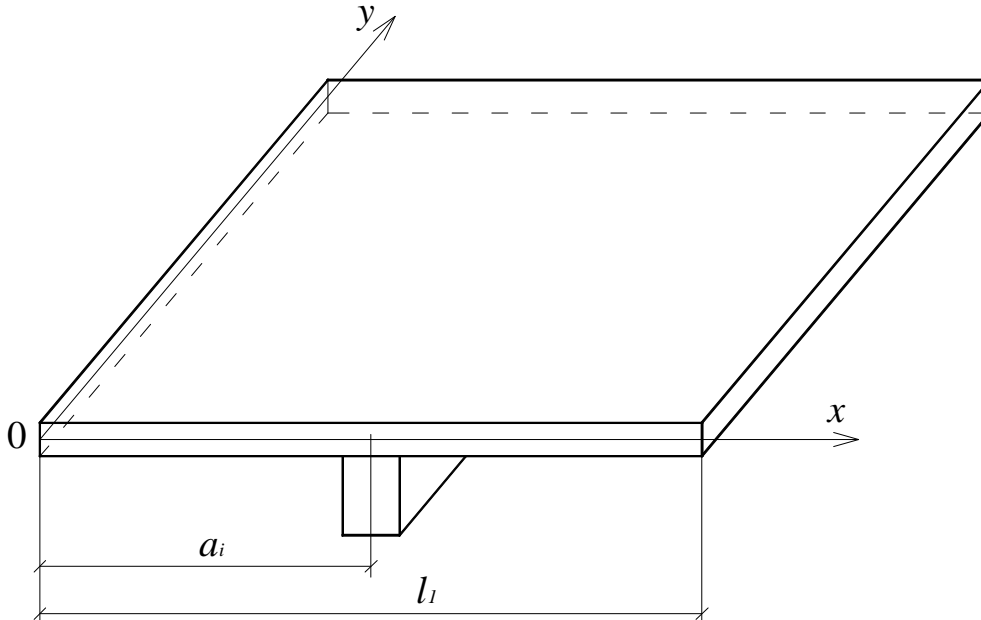


Рис. 1. Пластика з ребром у подовжньому напрямку

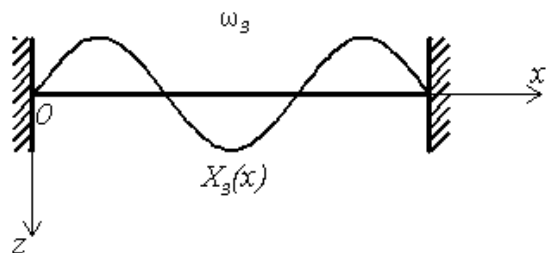
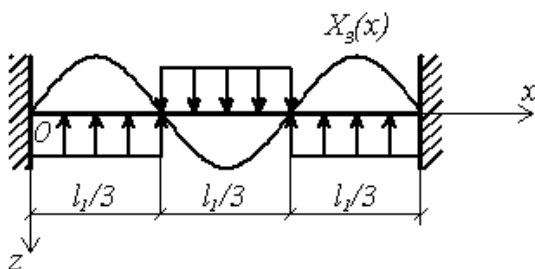
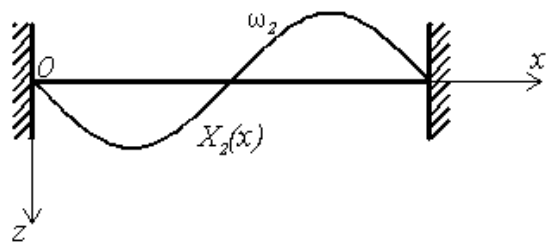
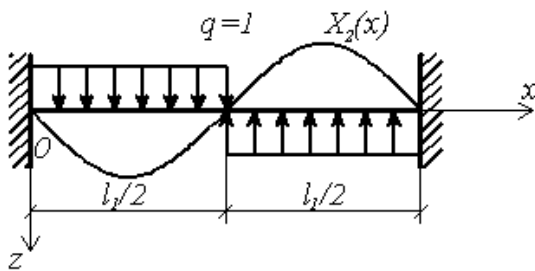
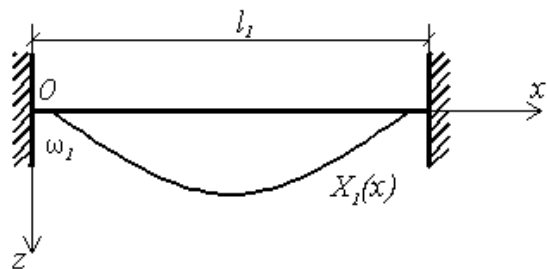
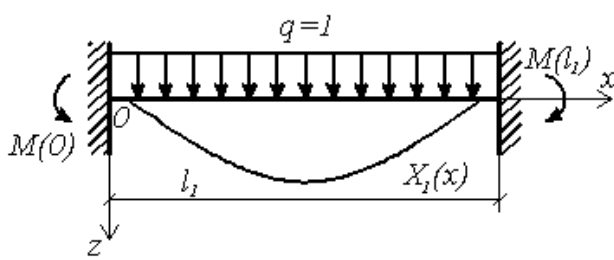


Рис. 2. Функції прогинів (статика)

Рис. 3. Функції прогинів (динаміка)

$$Q(0) = -D\bar{A}[W'''(0) - (2 - m)r^2W'(0)], \quad (4)$$

де

$$r^2 = -\bar{B}/\bar{A}; \quad s^4 = C/\bar{A}; \quad \bar{q}(y) = \int_0^{l_1} \bar{q}(x, y) X(x) dx / \bar{A}; \quad (5)$$

$$\bar{A} = A + \frac{1}{D} \sum_{i=1}^n EI_x X^2(a_i) + \frac{1}{D} \sum_{i=1}^n EI_w [X'(a_i)]^2; \quad (6)$$

$$\bar{B} = B + \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^n EI_k [X'(a_i)]^2 + \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^n \frac{GA}{k_1} X^2(a_i); \quad (7)$$

$$A = \int_0^{l_1} X^2(x) dx; \quad B = \int_0^{l_1} X''(x) X(x) dx; \quad C = \int_0^{l_1} X^{IV}(x) X(x) dx. \quad (8)$$

Результати та їх оговорення

Диференційне рівняння (3) за своєю структурою аналогічно рівнянню, що описує вигин пластин без ребристих підкріплень [4], однак вигляд виразень (5)–(7) свідчить про те, що в (3) враховані параметри ребер.

Кінематичні і статичні параметри вигину підкріпленої пластини зовні збережуть той же вид, що і для пластини без ребер, але чисельно, звичайно, будуть відрізнятися, тому що вхідний прогин $W(y)$ у наведеному нижче виразі буде відрізнятися від прогину відповідної «гладкої» пластини:

$$\begin{aligned} q_x(x, y) &= W(y) X'(x); \quad q_y(x, y) = W'(y) X(x); \\ M_x(x, y) &= -D [W(y) X''(x) + mW''(y) X(x)]; \\ M_y(x, y) &= -D [W''(y) X(x) + mW(y) X''(x)]; \\ H_x(x, y) &= -H_y(x, y) = -D(1-m)W'(y) X'(x); \\ V_x(x, y) &= -D [W_y(y) X'''(x) + W''(y) X'(x)]; \\ V_y(x, y) &= -D [W'''(y) X(x) + W'(y) X''(x)], \end{aligned}$$

де $q_x(x, y), q_y(x, y)$ – кути поворотів; $M_x(x, y), M_y(x, y)$ – згинальні моменти; $H_x(x, y), H_y(x, y)$ – крутильні моменти; $V_x(x, y), V_y(x, y)$ – поперечні сили.

Таким чином, при використанні методу Канторовича-Власова рішення основного диференційного рівняння задачі зводиться до визначення прогину (2), де функція $X(x)$ задана, а функція $W(y)$ визначається у вигляді

$$DW(y) = A_{11} \cdot DW(0) + A_{12} \cdot Dq(0) - A_{13} \cdot M(0) - A_{14} \cdot Q(0) + \int_0^y A_{14}(y-x) q(x) dx.$$

Рішення рівняння (3) залежить від коренів відповідного йому характеристичного рівняння, що представляються вираженням

$$k_{1-4} = \pm \sqrt{r^2 \pm \sqrt{r^4 - s^4}}.$$

Вид фундаментальних функцій визначається співвідношенням між r і s , що залежить від граничних умов на подовжніх краях пластини і параметрів ребер жорсткості. Тут можливі шість випадків.

1. $|s| > |r|$, при цьому $k_{1-4} = \pm a \pm ib$,

$$\text{де } a = \sqrt{\frac{s^2 + r^2}{2}}; \quad b = \sqrt{\frac{s^2 - r^2}{2}}.$$

2. $s = r$, $k_{1-4} = \pm \sqrt{r^2}$.

3. $|s| < |r|$, $I_1 = \sqrt{r^2 + \sqrt{r^4 - s^4}}$, $I_2 = \sqrt{r^2 - \sqrt{r^4 - s^4}}$.

4. $k_{1,2} = 0$; $k_{3,4} = \pm r_1$; $r_1 = -2\bar{B}/\bar{A}$.

5. $k_{1,2} = \pm ib$; $k_{3,4} = \pm a$.

6. $k_{1,2} = \pm ai$; $k_{3,4} = \pm bi$.

Прогин $W(y)$ в кожному з цих випадків запишеться у виді

$$W(y) = C_1 \Phi_1 + C_2 \Phi_2 + C_3 \Phi_3 + C_4 \Phi_4,$$

але функції $\Phi_1 - \Phi_4$ будуть різними.

Кожному з розглянутих вище коренів характеристичного рівняння відповідає своя система

фундаментальних функцій [2].

Розглянемо квадратну пластинку із шарнірним обпиранням по всьому контуру, завантажену рівномірно розподіленим навантаженням (рис. 4).

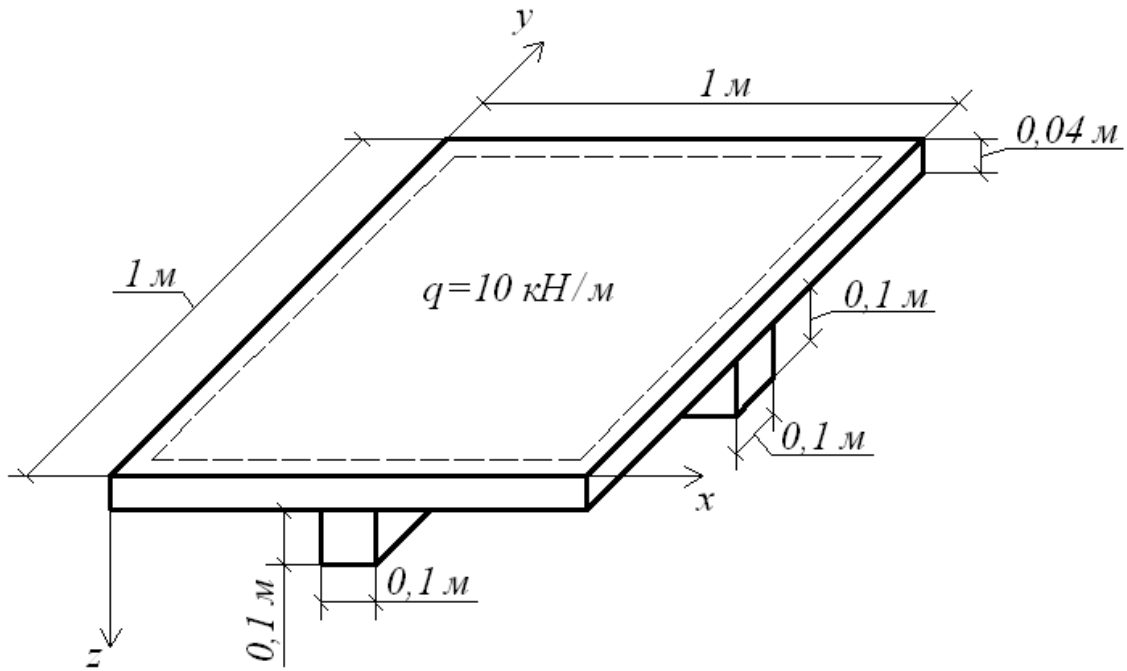


Рис. 4. Квадратна пластинка із шарнірним обпиранням

Пластинка має по одному ребру жорсткості суцільного квадратного перетину в кожному напрямку. Це обмеження ніяк не позначиться на спільності розглянутого алгоритму МГЕ.

Сформуємо матриці X_* , Y й B і врахуємо, що область пластини дискретизується на три підобласті зі східчастою жорсткістю (рис. 5).

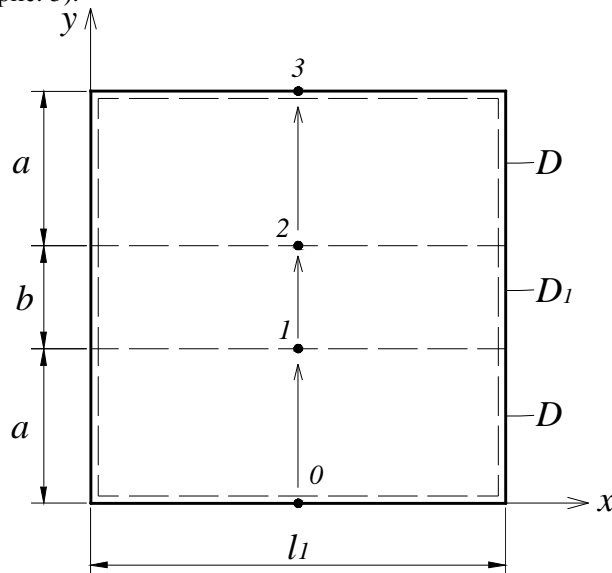


Рис. 5. Дискретизація пластини на три підобласті

Області 0– 1 і 2– 3 – це області пластини (з одним ребром у подовжньому напрямку) товщиною h , циліндрична жорсткість якої

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (9)$$

а область 1– 2 теж будемо розглядати як пластину (без ребер), але товщиною $h_1 = h + h_{\text{ребра}}$ з циліндричною жорсткістю

$$D = \frac{Eh_1^3}{12(1 - \nu_1^2)}, \quad (10)$$

де m_1 – усереднений коефіцієнт Пуассона пластини і ребра.

Матриці МГЕ приймають вид (11).

$$\begin{matrix}
 1 & DW^{0-1}(0) = 0; & & DW^{0-1}(a) = DW^{1-2}(0) & & -B_{11}(a) \\
 & Dq^{2-3}(a) & & & & \\
 2 & Dq^{0-1}(0) & & Dq^{0-1}(a) = Dq^{1-2}(0) & & -B_{21}(a) \\
 3 & M^{0-1}(0) = 0; & & M^{0-1}(a) = M^{1-2}(0) & & B_{31}(a) \\
 & Q^{2-3}(a) & & & & \\
 4 & Q^{0-1}(0) & & Q^{0-1}(a) = Q^{1-2}(0) & & B_{41}(a) \\
 5 & D_1W^{1-2}(0) & & D_1W^{1-2}(b) = D_1W^{2-3}(0) & & -b_{11}(b) \\
 X_* = & D_1q^{1-2}(0) & ; Y = & D_1q^{1-2}(b) = D_1q^{2-3}(0) & ; B = & -b_{21}(b) & (11) \\
 7 & M^{1-2}(0) & & M^{1-2}(b) = M^{2-3}(0) & & b_{31}(b) \\
 8 & Q^{1-2}(0) & & Q^{1-2}(b) = Q^{2-3}(0) & & b_{41}(b) \\
 9 & DW^{2-3}(0) & & DW^{2-3}(a) = 0 & & -B_{11}(a) \\
 10 & Dq^{2-3}(0) & & Dq^{2-3}(a) & & -B_{21}(a) \\
 11 & M^{2-3}(0) & & M^{2-3}(a) = 0 & & B_{31}(a) \\
 12 & Q^{2-3}(0) & & Q^{2-3}(a) & & B_{41}(a)
 \end{matrix}$$

З (11) випливає, що в матриці A_* необхідно обнулити перший і третій стовпці. Далі параметри з вектора Y переносяться у вектор X_* .

Матричне рівняння МГЕ для пластини з ребрами жорсткості в двох напрямках прийме вигляд

$$\begin{matrix}
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\
 1 & A_{12} & -A_{14} & -\frac{D}{D_1} & & & & & & & & D\theta^{2-3}(a) & -B_{11}^{0-1}(a) \\
 2 & A_{11} & -A_{13} & & -\frac{D}{D_1} & & & & & & & D\theta^{0-1}(0) & -B_{21}^{0-1}(a) \\
 3 & -A_{32} & A_{12} & & & & -1 & & & & & Q^{2-3}(a) & B_{31}^{0-1}(a) \\
 4 & -A_{31} & A_{11} & & & & & -1 & & & & Q^{0-1}(0) & B_{41}^{0-1}(a) \\
 5 & & & a_{11} & a_{12} & -a_{13} & -a_{14} & -\frac{D_1}{D} & & & & D_1W^{1-2}(0) & -b_{11}^{1-2}(b) \\
 6 & & & a_{21} & a_{22} & -a_{12} & -a_{13} & & -\frac{D_1}{D} & & & D_1\theta^{1-2}(0) & -b_{21}^{1-2}(b) \\
 7 & & & -a_{31} & -a_{32} & a_{22} & a_{12} & & & -1 & & M^{1-2}(0) & b_{31}^{1-2}(b) \\
 8 & & & -a_{41} & -a_{31} & a_{32} & a_{11} & & & & -1 & Q^{1-2}(0) & b_{41}^{1-2}(b) \\
 9 & & & & & & & & A_{11} & A_{12} & -A_{13} & -A_{14} & DW^{2-3}(0) & -B_{11}^{2-3}(a) \\
 10 & -1 & & & & & & & A_{21} & A_{22} & -A_{12} & -A_{13} & D\theta^{2-3}(0) & -B_{21}^{2-3}(a) \\
 11 & & & & & & & & -A_{31} & -A_{32} & A_{22} & A_{12} & M^{2-3}(0) & B_{31}^{2-3}(a) \\
 12 & & -1 & & & & & & -A_{41} & -A_{31} & A_{32} & A_{11} & Q^{2-3}(0) & B_{41}^{2-3}(a)
 \end{matrix} \quad (12)$$

В (12) малими буквами a_{ij}, b_{il} позначені матриці фундаментальних функцій і навантаження середньої частини $l - 2$ (рис. 5) як пластини, що не має ребер жорсткості. Великими буквами A_{ij}, B_{il} позначені функції пластини з ребрами в подовжньому напрямку.

Прогини частин $0 - 1, 2 - 3$ пластини визначаються вираженням

$$DW(x, y) = W(y) \cdot X(x) = [DW(0) \cdot A_{11}(y) + Dq(0) \cdot A_{12}(y) - M(0) \cdot A_{13}(y) - Q(0) \cdot A_{14}(y) + B_{11}(y)] \cdot X(x).$$

Відповідно, прогин частини $l - 2$ (пластина з ребром у поперечному напрямку)

$$D_1 W(x, y) = W_1(y) \cdot X(x) = [D_1 W(0) \cdot a_{11}(y) + D_1 q(0) \cdot a_{12}(y) - M(0) \cdot a_{13}(y) - Q(0) \cdot a_{14}(y) + b_{11}(y)] \cdot X(x).$$

Всі інші параметри вигину пластини з ребрами жорсткості в двох напрямках визначаються за рівняннями теорії пружності. У результаті розрахунку обчислені прогин і згинальний момент у центрі пластинки; результати розрахунку дані в таблиці 1, де наводяться також значення прогину і згинаючого моменту в центрі пластинки, обчислені методом кінцевих елементів у програмі ANSYS.

Таблиця 1

Величина	Порівняння результатів		Розбіжність, %
	Шарнірне обпирання, розподілене навантаження		
Прогин, м	МГЕ	МКЕ	
	-0,42923e-05	- 0,41665e-05	2,93
Згинальний момент, кН·м	3,6508e-02	3,6992e-02	1,31

Висновки

Після побудови фундаментальних функцій, функції Гріна і формування векторів зовнішніх навантажень можна реалізувати алгоритм МГЕ [1] для будь-яких граничних умов і довільного числа ребер (як суцільного перетину, так і тонкостінного) в обох напрямках.

Загальна концепція запропонованого підходу полягає в наступному. Частина пластини, що мають ребра в поперечному напрямку (паралельно осі ox), розглядаються як «гладкі» пластини товщиною $h_1 = h + h_{\text{ребра}}$, де h – товщина власне пластини, $h_{\text{ребра}}$ – висота підкріплювального ребра. Для цих модулів справедлива теорія розрахунку «гладких» пластин методом граничних елементів, докладно викладена в [1, 2], з відповідними вираженнями фундаментальних функцій, функції Гріна, векторів навантажень і т.д. Інші модулі являють собою пластини, підкріплені ребрами жорсткості в подовжньому напрямку (паралельно осі Oy), і для них фундаментальні функції, функції Гріна, вектори навантажень визначаються вираженнями, отриманими для ребристих пластин.

Література

1. Численные методы в механике / [Баженов В.А., Оробей В.Ф., Сурьянинов Н.Г. и др.]. – Одесса, «СТАНДАРТЬ», 2005. – 563 с.
2. Численно-аналитический метод граничных элементов : в 2-х т. / [Дашенко А.Ф., Коломиец Л.В., Оробей В.Ф., Сурьянинов Н.Г.]. – Одесса. – СтандартЪ, 2010.
3. Власов В.З. Тонкостенные пространственные системы / Власов В.З. – М. : Стройиздат, 1958. – 502 с.
4. Биргер И.А. Сопrotивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М. : Наука, 1986. – 560 с.

Надійшла 16.12.2011 р.

Статтю представляє: д.т.н. Параска Г.Б.

УДК 621.891

В.П. СВИДЕРСЬКИЙ, Л.П. МЕЛЬНИЧУК, Д.І. КЛАК
Хмельницький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОРШНЕВОГО УЩІЛЬНЕННЯ КОМПРЕСОРА 2ФВ-4/4.5 КОНДИЦІОНЕРА GMS

Виконано аналіз роботи і видів зношування поршневого ущільнення компресора 2Ф-4/4.5 кондиціонера GMS. Розроблено методуку і виконані стендові дослідження зносостійкості антифрикційних матеріалів поршневого ущільнення, що показали доцільність застосування в якості ущільнюючих елементів матеріалу Ф4УВ20.

The analysis of the operation and types of wear in piston compaction of the compressor 2F-4/4.5 of the conditioner GMS has been performed. The methodology have been developed and the stand tests of wear resistance of antifricition materials used for piston compaction have been carried out which proved the expediency of using the F4UB20 material for compacting elements.

Ключові слова: поршневе ущільнення, антифрикційні матеріали.

Вступ

Транспортна система кондиціонування повітря функціонує в основному так само, як і будь-який інший тип системи кондиціонування повітря. Транспортна система призначена для відбору тепла і вологи зсередини автомобіля та їх передачі зовнішньому повітрю, а також для очищення повітря.