

УДК 539.3

**Напружено-деформований стан стільникової панелі
з вуглепластиковою обшивкою під дією власної ваги**

В.В. Рубашевський, С.М. Шукаєв
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

***Анотація:** В роботі розглянуто задачу з визначення прогину і напружень трьохшарової панелі із стільниковим наповнювачем і вуглепластиковою обшивкою, що складається з моношарів із схемою армування $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$. Було виконано перехід від багатошарової конструкції до трьохшарової завдяки визначенню ефективних пружних характеристик обшивки і з використанням таблиць Гладкова отримали напруження і максимальний прогин вільно опертої панелі під дією власної ваги.*

***Ключові слова:** стільникова панель, пружні характеристики, композиційні матеріали, напружено-деформований стан.*

Тришарові панелі із стільниковим заповнювачем, все частіше застосовуються в сучасних космічних і літальних апаратах. Зазвичай такі панелі деформуються так, що їх прогин від навантаження не перевищує товщини панелі, або і взагалі є набагато меншим. Крім того в наш час все частіше несучий шар панелі виготовляють з композиційних матеріалів, зазвичай шаруватих вуглепластиків, сама структура клеєної стільникової панелі представлена на рис. 1. Тому для забезпечення міцності і розміростабільності несучої конструкції слід приділити велику увагу розробці методів та алгоритмів розрахунку напруженого деформованого стану таких сандвіч панелей. Визначення малих прогинів багатошарових панелей є актуальною задачею оскільки ці переміщення сильно впливають на коливання панелей під час їх експлуатації.

Метою роботи є апробація методики визначення максимального прогину панелі і напружень, що виникають під дією власної ваги, за рахунок переходу від багатошарової панелі до трьохшарової.

Трьохшарова конструкція (рис. 1) складається з вуглепластикової обшивки (1) товщиною 0,8 мм із схемою армування $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$ і стільникового заповнювача (2) із алюмінієвої фольги 5056-6-23 товщиною 76 мм, у таблиці 1 наведені механічні характеристики даних матеріалів. Пластина має розміри: $a = 543\text{ мм}$, $b = 504\text{ мм}$ (рис. 2), вага панелі складає 1,052 кг.

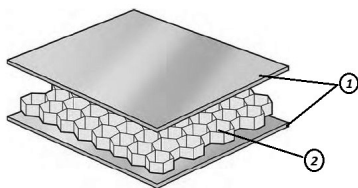


Рис. 1. Трьохшарова конструкція. (1) — вуглепластикові обшивки, (2) — стільниковий заповнювач.

Таблиця 1

Механічні характеристики матеріалів

Матеріал	E_1 , МПа	E_2 , МПа	E_3 , МПа	μ_{12}	μ_{23}	μ_{13}	G_{12} , МПа	G_{23} , МПа	G_{13} , МПа	ρ , кг/м ³
Моношар вуглепластику	175160	9615	9615	0,282	0,436	0,282	4856	3350	4856	1500
Алюмінієва фольга 5056-6-23	1	1	462	0,49	0,001	0,001	0,00001	59,65	87,86	19

Розрахунок проводився на основі формул отриманих за результатами дослідження розв'язків диференціальних рівнянь тришарових панелей і оболонок [1]. Тому, спочатку необхідно було зробити перехід від 9-ти шарової панелі до тришарової, для цього були попередньо визначені еквівалентні пружні характеристики обшивки методом Хорошуна [2,3], результати яких наведені у таблиці 2 [4].

Таблиця 2

Пружні характеристики обшивки з вуглепластику

E_x , МПа	E_y , МПа	E_z , МПа	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	G_{xy} , МПа	G_{yz} , МПа	G_{xz} , МПа
72685,2	72685,2	9615	0,315	0,222	0,222	24544,7	4103	4103

Для практичних розрахунків таких панелей можна використовувати формули для розрахунку одношарових пластин. Фізичний сенс такого розрахунку полягає в тому, що прогини і напруження тришарових панелей в порівнянні з прогинами і напруженнями у відповідних одношарових пластинах корегуються параметром ψ який враховує вплив поперечного зсуву стільникового заповнювача і крайових умов на прогин тришарової панелі.

Максимальний прогин тришарової панелі w_{\max} визначається за формулою [1]:

$$w_{\max} = \frac{w_0}{\psi} \quad (1)$$

де w_0 — відповідний прогин одношарової пластини, що має розміри a і b , циліндричну жорсткість D , і такі ж самі крайові умови та умови навантаження.

Циліндрична жорсткість панелі визначається за формулою

$$D = \frac{E_f \cdot H_1^2 \cdot \delta_f}{12(1 - \mu^2)} = 3,973 \cdot 10^6 \text{ Н / мм} \quad (2)$$

де $E_f = E_z$, $\mu = \mu_{yz} = \mu_{xz}$ модуль пружності першого роду і коефіцієнт Пуассона несучих шарів; $H_1 = 76,8 \text{ мм}$ — відстань між центрами мас несучих шарів; $\delta_f = 0,8 \text{ мм}$ — товщина несучого шару.

З урахуванням коефіцієнтів прогинів, згинаючих моментів і поперечних сил у рівномірно навантаженій панелі, яка вільно опирається по чотирьох сторонах (рис. 2) [1], параметр ψ для формули 1 набуває значення $\psi = 0,82$.

Значення параметра ψ одержуємо з графіків наведених у роботі [1] в залежності від відношення розмірів a/b і параметра зсуву

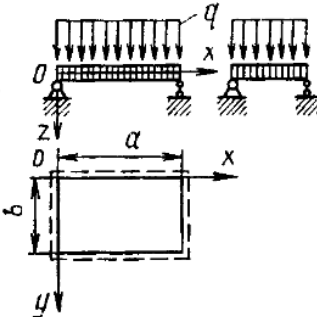


Рис. 2. Умови навантаження і граничні умови [1]

$$k_0 = \frac{2,46h_c E_f 2\delta_f}{b^2 G_o (1-\mu)} = 0,161, \quad (3)$$

де $h_c = 76 \text{ мм}$ — висота стільникового заповнювача, а G_o — осереднений модуль зсуву стільникового заповнювача, який визначається за формулою

$$G_o = 0,5(G_{13} + G_{23}) = 73,755 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Формули для визначення максимального прогину w_0 , максимальних напружень згину в несучих шарах σ_i і максимальних дотичних напружень поперечного зсуву в стільниковому заповнювачеві τ_{xz} , τ_{yz} , відповідно, записуються так:

$$w_0 = \gamma \frac{qb^4}{D} = 2,915 \cdot 10^{-3} \text{ мм}, \quad (5)$$

$$\sigma_i = \pm 6 \frac{M_i}{H^2} \cdot \frac{1-0,5(1+t)(1-\psi)}{\psi(1-t^3)}, \quad (6)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = \frac{\eta_0 Q}{h_c}, \quad (7)$$

де $t = h_c / H$ — відносна товщина заповнювача; M_i — погонний згинаючий момент для відповідної одношарової пластини із знаком «+» для нижнього шару і знаком «-» для верхнього; Q — погонна поперечна сила для відповідної одношарової пластини; $\eta_0 = 0,985$ — параметр, рівний відношенню поперечної сили, яку сприймає стільниковий заповнювач до повної поперечної сили, що залежить від t ; $\gamma = 0,00467$ — коефіцієнт прогину заданого співвідношення a/b ; $q = 0,00003844 \text{ Н/мм}^2$ — розподілене навантаження по площі. В результаті проведення всіх підстановок і розрахунків було отримано наступні результати, які зведені до таблиці 3.

Для апробації отриманих результатів було проведено чисельний розрахунок методом скінченних елементів (МСЕ) у модулі Static Structural програмного середовища ANSYS Workbench за наступним алгоритмом: задано характеристики для вуглепластикової обшивки з таблиці 2 і стільникового заповнювача з таблиці 1; змодельована геометрія трьохшарової панелі; накладено скінченно елементу сітку з використання «Solid 186» з 145601 вузлів і 33000 елементів, а також задано навантаження та граничні умови. Результати розрахунку також представлені у таблиці 3, де, крім того, наведені розбіжності результатів розрахунків за аналітичним методом і МСЕ.

Таблиця 3

Результати розрахунків

Метод	Нормальні напруження, Па	Дотичні напруження, Па	Максимальний прогин, мм
Аналітичний метод	11041	110,3	0,003554
МСЕ	10433	124,5	0,003786
Різниця, %	5,83	12,87	6,53

Висновки: Таким чином, можна зробити висновок, що результати розрахунків виконаних за розглянутими вище методами задовільно узгоджуються між собою. Їхня різниця у визначенні нормальних напружень і максимального прогину не перевищує 7%, а дотичних напружень — 13%. Отримані результати підтвердили доцільність застосування ефективних пружних характеристик обшивки для визначення прогинів та напружень у випадку малих прогинів, коли прогин від навантаження не перевищує товщини панелі або є набагато меншим.

Напряженно деформированное состояния сотовой панели из углепластиковой обшивкой под действием собственного веса

В.В. Рубашевський, С.М. Шукаев

Аннотация: В работе рассмотрена задача по определению прогиба и напряжений трехслойной панели с сотовым наполнителем и углепластиковой обшивкой, состоящий из монослоев со схемой армирования $[0^\circ / 90^\circ / 45^\circ / -45^\circ]$. Было выполнено переход от многослойной конструкции к трехслойной благодаря определению эффективных упругих характеристик обшивки и с использованием таблиц Гладкова получили напряжение и максимальный прогиб свободно опертой панели под действием собственного веса.

Ключевые слова: сотовая панель, упругие характеристики, композиционные материалы, напряженно-деформированное состояние.

Stress-Strain state of the honeycomb panel with carbon fiber reinforced polymer facings under its own weight

V. Rubashevskiy, S. Shukayev

Abstract: The work considers the task of determining the deflection and stresses of a three-layer panel with a honeycomb core and carbon-fiber facings, consisting of monolayers with a reinforcement scheme $[0^\circ / 90^\circ / 45^\circ / -45^\circ]$. The transition from a multi-layer structure to a three-layer structure was carried out due to the determination of the effective elastic characteristics of the facing and using the Gladkov tables to obtain the stress and maximum deflection of a freely supported panel under its own weight.

Keywords: honeycomb, elastic characteristics, composite materials, stress-strain state.

Список літератури

1. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с наполнителем: Справочник. —М.: Машиностроение, 1991. — 272 с.: ил.
2. Хорошун Л.П. Статистическая механика и эффективные свойства материалов // Механика композитов// Под ред. А.Н. Гузя. – К: Наук. думка, 1993. – Т. 3. – 390 с.
3. «Методы автоматизированного расчета физико-механических постоянных композиционных материалов». Хорошун Л. П., Маслов Б.П. Киев, Наук. думка, 1980. — 156 с.
4. Victor Rubashevskiy, Sergiy Shukayev. «The estimation of effective elastic properties of a composite three-layer cellular panel»//Materials for use in extreme conditions – 7. Kiev. Ukraine. (2017) 30 Nov – 2 Dec — p.p. 25-27.