

УДК 539.3

РОЗРАХУНОК БАГАТОШАРОВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Трубачев С.І., Колодежний В.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Робота присвячена розрахунку напружено-деформованого стану та коливань багатошарових фотоелектричних модулів сонячних батарей варіаційно-сітковим методом. Приведені результати розрахунків на згин та коливання шаруватих пластин. Виконано порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними. Досліджений вплив поперечної сили на прогин тришарової пластини.

Ключові слова: коливання, власні частоти, власні форми, тришарові пластини, напружено-деформований стан, варіаційно-сітковий метод.

Постановка проблеми. В промисловості широко використовуються тришарові пластини та плити з скляними зовнішніми шарами та основним шаром з полівінілбутирала (ПВБ) [1, 2]. Кристалічні або тонкоплівкові фотоелектричні модулі, які зараз доступні на ринку, складаються з зовнішніх скляних або полімерних шарів і шару сонячних батарей, які вбудовані в полімерний наповнювач [3, 4, 5]. Легка конструкція фотоелектричних модулів включає передню та задню панелі із пластмаси. Ці зовнішні шари з'єднані з прозорим поліуретаном (ПУР), в який вбудовані сонячні батареї [6]. Рис. 1 ілюструє різні типи фотоелектричних модулів.

Для проектування скляних ламінатів і фотоелектричних модулів необхідно аналізувати придатність таких матеріалів, як ПВБ та етиленвінілацетат (ЕВА) для вбудовування сонячних батарей. Ці наповнювачі повинні компенсувати різні механічні та термічні деформації верхніх та нижніх шарів. Необхідно уникати розшарування і сонячні батареї повинні бути захищені від вологи та повітря. Механічні властивості м'яких наповнювачів зазвичай страждають в процесі виготовлення. Крім того, вплив навколишнього середовища може призвести до зміни механічних властивостей з плином часу. Тому надійна оцінка характеристик жорсткості можлива лише шляхом випробування прототипу, наприклад, згин балки або плити. Щоб оцінити результати випробувань необхідні надійні методи структурного аналізу, які стосуються глобального деформованого стану, наприклад, прогину, а також локального напружено-деформованого стану, наприклад, напружень і деформацій від прикладеного поперечного навантаження.

Основною особливістю ламінованих склом фотоелектричних модулів, якщо порівнювати з «сандвічами» і ламінатами легких структур, є те, що вони мають жорсткі зовнішні шари і відносно податливий шар наповнювача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що в основному досліджувалися системи під дією статичних навантажень з простими граничними умовами [2–5].

Викладення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо досліджень коливань багатошарових пластин з різними наповнювачами перерізу з використанням ефективних чисельних методик розрахунків, які програмно реалізовані і апробовані на практичних задачах.

Метою статті є розробка методики розрахунку багатошарових фотоелектричних модулів сонячних батарей під дією статичних та вібраційних навантажень

Виклад основного тексту. Нехай G_S – модуль зсуву скляного зовнішнього шару і G_C – модуль зсуву полімерного шару. Відношення модулів зсуву $\mu = G_C/G_S$ для матеріалів, які використовуються в сонячних батареях, знаходяться в діапазоні від 10^{-5} до 10^{-2} , в залежності від виду полімеру і температури. Для класичного сандвіча використовується співвідношення, що знаходиться в діапазоні між 10^{-2} і 10^{-1} . Крім того, в класичній конструкції сандвіча зовнішні шари тонкі в порівнянні з ядром, а в сонячних батареях зовнішні шари товсті, а ядро дуже тонке.

В даній роботі представлені результати структурного експериментального аналізу та аналізу методом скінченних елементів ламінованих склом балок з основними шарами з різних полімерів, які використовуються в фотоелек-

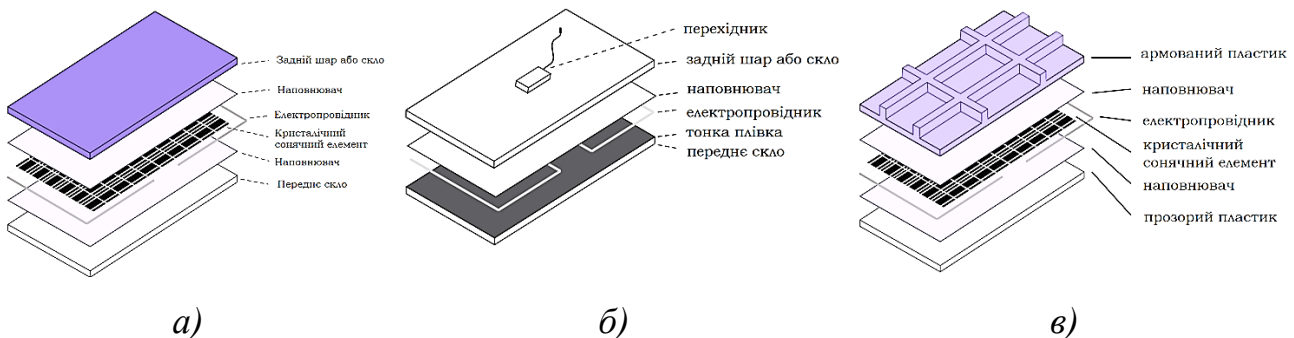


Рис. 1. Компоненти плівкового (а), легкого (б) і кристалічного (в) сонячного модуля

Джерело: [3]

тричний промисловості. Розглянемо вільно оперту ламіновану склом пластину (рис. 2), що навантажена поперечною силою по центру. Необхідно визначити максимальний прогин та напруження в кожному шарі. В [3] були наведені значення максимального прогину при випробуваннях ламінованої склом пластини на трьохточковий згин (рис. 3) при різних значеннях поперечної сили F .

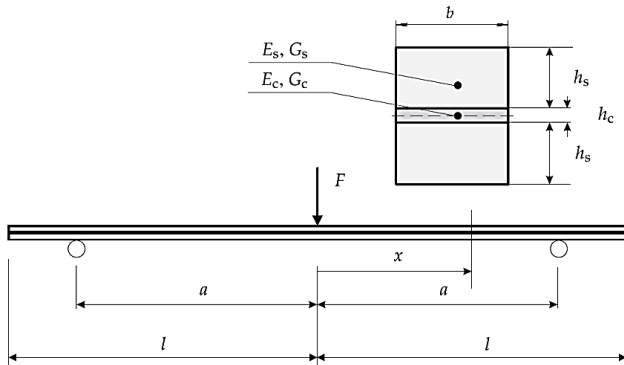


Рис. 2. Схема вільно опертої пластини: $a = 192$ мм, $b = 50$ мм, $l = 250$ мм, $h_c = 0,4$ мм, $h_s = 2,92$ мм, $E_s = 70$ ГПа, $\nu_c = 0,45$, $\nu_s = 0,23$

Джерело: розроблено авторами

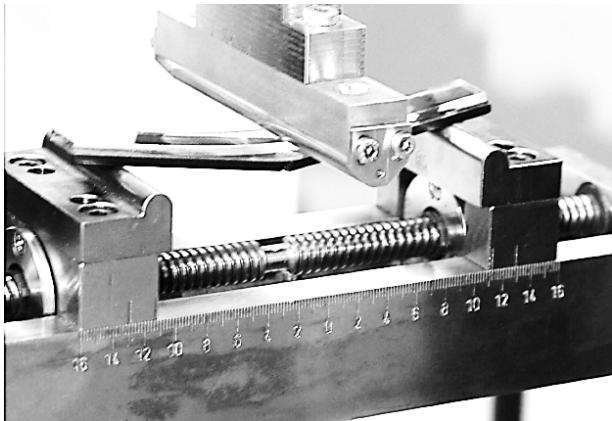


Рис. 3. Трьохточковий згин

Джерело: [3]

При розв'язку задачі коливань чисельними методами нескінченномірний простір допустимих функцій V замінюється скінченномірним V_h шляхом дискретизації системи. При цьому задача замінюється наближеною: для заданого скінченномірного простору V_h необхідно знайти такі значення ω , u_h , що

$$(Ku_h, v_h) = \omega^2 (Mu_h, v_h), \quad \forall v_h \in V_h. \quad (1)$$

Для скінченноелементного аналізу використовувався програмний пакет FEMAP v11.1.0. За рахунок симетричності випробуваного зразка раціонально розглядати його половину, закріплюючи переріз розсічення по нормалі. Для моделювання зразка було використано 12750 елементів типу PARA SOLID та 57790 вузлів. Дана модель має 8 елементів по товщині зовнішнього шару і 2 елементи по товщині основного шару. На рис. 4 зображено скінченноелементну сітку, крайові умови та навантаження.

На рис. 5 зображено розподіл напружень шарів деформованої пластини під дією $F = 35$ Н та при $E_c = 3,5$ МПа.

Не важко бачити, що напруження в основному шарі дорівнюють нулю, тобто вся несуча

здатність даної конструкції залежить від зовнішніх шарів.

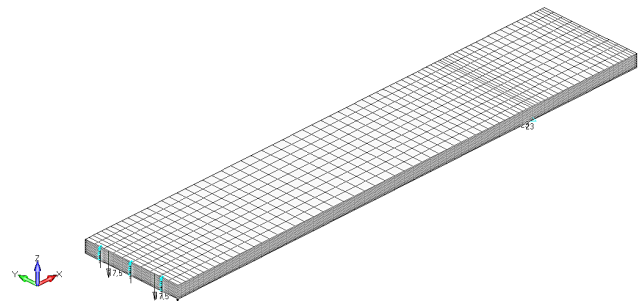


Рис. 4. Скінченноелементна модель

Джерело: розроблено авторами

Порівняння експериментальних значень максимального прогину та отриманих за допомогою чисельного методу наведено в на рис. 6.

Так як запропонована модель показала високу збіжність з експериментальними даними, то за допомогою методу скінченних елементів було визначено власні форми та частоти коливань ламінованої склом балки з основним шаром з ПВБ. Власні частоти наведені в таблиці 1.

На рис. 7 зображені перші 6 власних форм коливань ламінованої пластини.

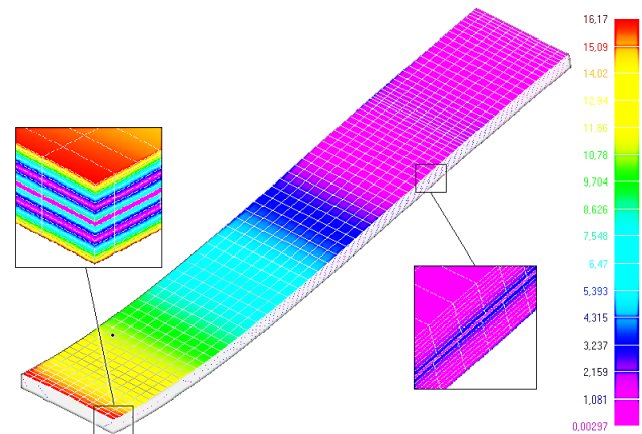


Рис. 5. Контурний графік напружень по Мізесу для $F = 35$ Н та $E_c = 3,5$ МПа

Джерело: розроблено авторами

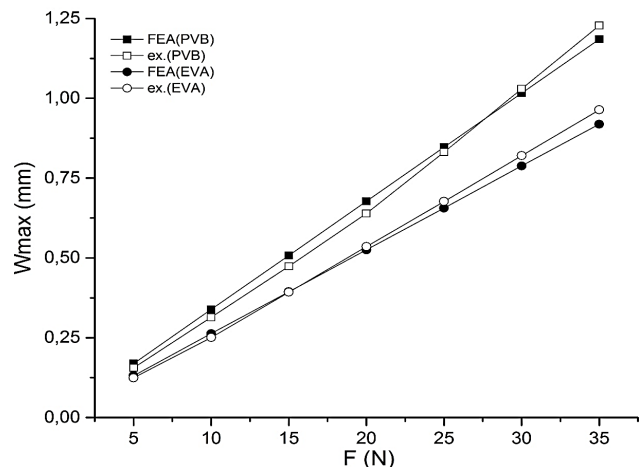


Рис. 6. Графіки залежності максимального прогину від сили для ПВБ ($E_c = 3,5$ МПа, $\nu_c = 0,45$) та ЕВА ($E_c = 7,9$ МПа, $\nu_c = 0,411$)

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1
Власні частоти коливань пластини
з основним шаром з ПВБ

№	ω , Гц	№	ω , Гц
1	77,31435	6	697,9014
2	226,2717	7	1004,343
3	398,9698	8	1023,139
4	527,2266	9	1138,941
5	558,7838	10	1441,973

Джерело: розроблено авторами

Висновки. В ході даної роботи була запропонована скінченноелементна модель ламінованої склом пластини сонячного модуля з м'яким основним шаром. Дана модель показала високу збіжність з експериментальними даними для таких матеріалів, як ПВБ і ЕВА. Були визначені напруження та деформації в шарах пластини. Також були визначені власні частоти та відповідні форми коливань.

Запропонована модель може бути використана при розрахунках та проектуванні фотоелектричних модулів сонячних батарей різних конфігурацій.

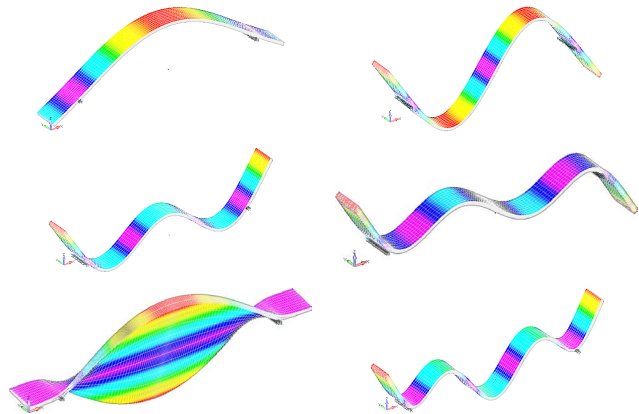


Рис. 7. Власні форми коливань ламінованої пластини

Джерело: розроблено авторами

Список літератури:

1. Трубочев С. І. Розрахунок ламінованої склом полімерної структури фотоелектричних модулів / С. В. Тетяра, С. І. Трубочев, О. О. Боронко // Material of the 12 International Scientific and Practical Conference «Modern European Science – 2016». – Sheffield. – 2016. – Vol. 9. – P. 16–23.
2. Ivanov I. V. Analysis, modeling, and optimization of laminated glasses as plane beam // International Journal of Solids and Structures, № 43, 2006.
3. Schulze S.-H., Pander M., Naumenko K., Altenbach H. Analysis of laminated glass beams for photovoltaic applications // International Journal of Solids and Structures, № 49, 2012.
4. Paggi M., Kajari-Schröder S., Eitner U. Thermomechanical deformations in photovoltaic laminates // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, № 46(8), 2011.
5. Corrado M., Paggi M. A multi-physics and multi-scale numerical approach to microcracking and power-loss in photovoltaic modules // Composite Structures, № 95, 2013.
6. Weps W., Naumenko K., Altenbach H. Unsymmetric threelayer laminate with soft core for photovoltaic modules // Composite Structures, № 105, 2013.

Трубочев С.И., Колодежный В.А.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

РАСЧЕТ МНОГОСЛОЙНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Аннотация

Работа посвящена расчету напряженно-деформированного состояния и колебаний многослойных фотоэлектрических модулей солнечных батарей вариационно-сеточным методом. Приведены результаты расчетов на изгиб и колебания слоистых пластин. Выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Исследовано влияние поперечной силы на прогиб трехслойной пластины.
Ключевые слова: колебания, собственные частоты, собственные формы, трехслойные пластины, напряженно-деформированное состояние, вариационно-сеточный метод.

Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»

CALCULATION OF MULTILAYER PHOTOELECTRIC MODULES OF SOLAR BATTERIES

Summary

The work is devoted to the calculation of the stress-strain state and oscillations of multilayer photovoltaic modules of solar cells by a variational-grid method. The results of calculations for bending and vibrations of laminated plates are presented. The results of the calculation are compared with the experimental data. The effect of shear force on the deflection of a three-layer plate was investigated.

Keywords: oscillations, eigenfrequencies, eigenmodes, three-layer plates, stress-strain state, variational-grid method.