

УДК 539.3
UDC 539.3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВИХ ПЛАСТИН

Рассказов О.О., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна
Бондарський О.Г., кандидат технічних наук, Луцький національний технічний університет,
Луцьк, Україна

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRESS AND STRAIN STATE OF MULTILAYERED PLATES

Rasskazov Oleksandr O., Ph.D., Engineering (Dr.), National Transport University, Kyiv, Ukraine
Bondarskyi Oleksandr H., Ph.D., Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН

Рассказов А.О., доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев,
Украина
Бондарский А.Г., кандидат технических наук, Луцкий национальный технический
университет, Луцк, Украина

Постановка проблеми.

В різних галузях сучасної техніки знайшли широке застосування тонкостінні шаруваті конструкції, виконані із композиційних матеріалів. Розрахунок таких конструкцій є досить складною задачею, основу розв'язку якої можуть складати теорії, які враховують вплив поперечного зсуву і нормального обтиснення шарів та їх ортотропію [1-3].

В роботах [4-6] розглянутий варіант прикладної теорії багатошарових оболонок та пластин в основу якого покладені гіпотези про розподіл по товщині поперечних дотичних напружень, нормальних дотичних деформацій і поперечного нормального напруження для всього пакету в цілому. Експериментальному дослідженню багатошарових конструкцій присвячено роботи [7, 8].

Важливою задачею є встановлення меж застосування наближених прикладних теорій для їх використання в практичних інженерних розрахунках. З цією метою проведені експериментальні дослідження напружено-деформованого стану багатошарових пластин і отримані результати співставленні з теоретичними розв'язками.

Досліджуються багатошарові пластини розміром 50×64 см. різної структури за товщиною (рис. 1). Перші чотири типи пластин несиметричної структури мали верхній шар у вигляді металевого листа завтовшки 1,3 мм. Три- і п'ятишарові пластини симетричної структури по товщині (V-VIII типи) не мали цього металевого шару. Крім металевого шару ($E = 2 \times 10^5$ МПа, $\nu = 0,33$), несучими шарами були склопластикові листи завтовшки 0,6 мм ($E_{11} = E_{22} = 2 \cdot 10^4$ МПа; $E_{33} = 4 \cdot 10^3$ МПа; $G_{12} = 4 \cdot 10^3$ МПа; $G_{13} = G_{23} = 3 \cdot 10^2$ МПа; $\nu_{13} = \nu_{23} = 0,5$; $\nu_{12} = 0,1$). Наповнювачем був пінопласт двох марок $E = 76$ кг/см²; $G = 3,6$ МПа; $\nu = 0,05$ і $E = 44$ МПа; $G = 29$ МПа; $\nu = 0,1$. Друга марка пінопласту застосована в IV типі шестишарових пластин і у VIII типі п'ятишарових пластин. В інших типах пластин використаний пінопласт першої марки.

При компоновці пластин несучі шари і шари заповнювача склеювалися смолою холодного затвердіння ЭД-20 і витримувалися під тиском протягом доби. В кожному із восьми типів випробовувалися по дві однакові пластини. Всього було 8 пластин несиметричної структури (I- IV типи) і 8 пластин симетричної структури (V-VIII типи). Пластини III і IV типів, а також VII і VIII, маючи однакову структуру по товщині, різнилися жорсткістю наповнювача.

Дослідження проводилися на спеціальному стенді для силових випробувань пластин, на якому можна забезпечити різні умови опирання. Статичні випробування багатошарових пластин проводилися при защемленні та шарнірному опиранні по контуру, а також при защемленні та шарнірному опиранні по двом протилежним сторонам.

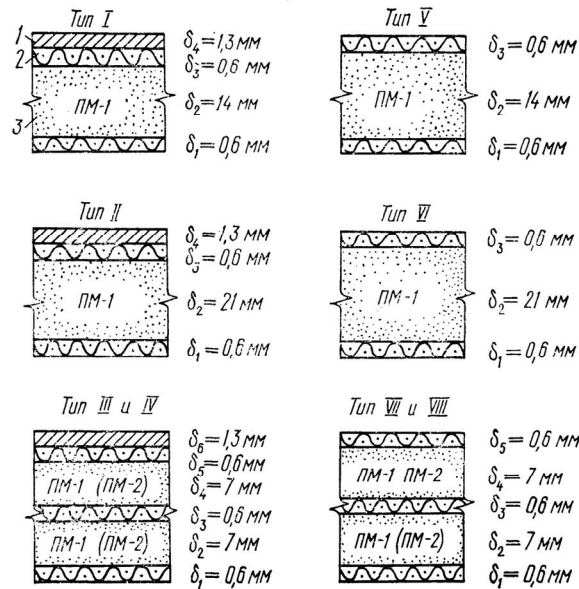


Рисунок 1 – Типи багатошарових пластин

За статичних випробувань рівномірно розподілене навантаження утворювалося вантажами і передавалося на панель через розподільну подушку із піску. Попередньо була встановлена межа лінійної залежності між навантаженням і прогином пластини. Завантаження і розвантаження проводилися поетапно. Інтенсивність навантаження $q = 0,0075$ МПа для несиметричних пластин (I-IV типи), $q = 0,0025$ МПа для симетричних (V- VIII типи).

Напружено-деформований стан багатошарових пластин, який виникав під дією рівномірно розподіленого навантаження, визначався на кожному із трьох етапів прикладання і зняття навантаження в дев'яти точках. Прогини пластин вимірювалися індикаторами годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм, а фіброві деформації склопластикових шарів визначалися за допомогою тензодатчиків опору з базою 20 мм і приладу ЦТМ-2 з ціною поділки $1 \cdot 10^{-5}$. Розетки склалися із чотирьох тензодатчиків, що дало можливість проводити контроль при опрацюванні результатів.

Оскільки прямокутні пластини, які знаходяться під дією рівномірно розподіленого навантаження, мають осі симетрії, прогини і напруження визначалися в чотирьох точках. На рис. 2 показані схеми розташування індикаторів (а) і тензодатчиків (б): перша точка – центр однієї четвертої частини поверхні пластини, друга і четверта – середини відповідно меншої і більшої сторони цієї поверхні, третя – центр всієї поверхні пластини.

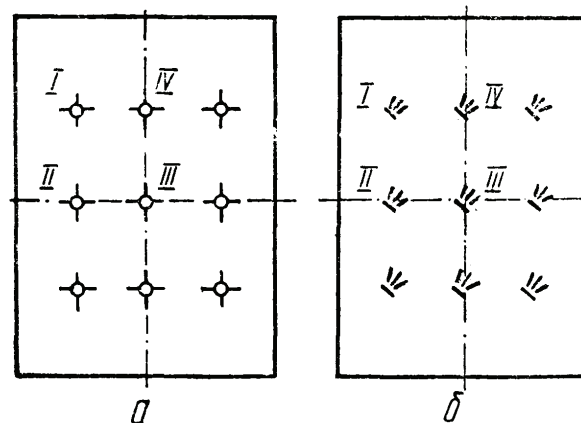


Рисунок 2 – Схеми розташування індикаторів (а) і тензодатчиків (б)

Порівнювалися результати експериментальних досліджень із числовими розв'язками задач статичного згину багатошарових пластин на основі рівнянь першого варіанту уточненої теорії [4]. Результати наведені у вигляді таблиць 1 і 2.

У таблицях наведені значення прогинів і напружень для пластин I –VIII типів, обчислені за рівняннями (2.20) [4] в порівнянні з експериментальними даними, які отримані за вище вказаною методикою.

Таблиця 1 – Значення прогинів і напружень для пластин I-IV типів

Тип структури	Прогини w , мм; Напруження σ_{10} , МПа	Шарнірне опирання контуру			Комбіноване опирання			Защемлення контуру		
		Експеримент	Рівняння (2.20) [1]	Δ , %	Експеримент	Рівняння (2.20) [1]	Δ , %	Експеримент	Рівняння (2.20) [1]	Δ , %
I	w	3,9	3,9	0	2,5	2,5	0	2,2	2	7
	σ_{11}	163	154	6	85,4	73	14	54,1	48,2	11
	σ_{22}	118	113	4	68,8	56	18	43,1	39	10
II	w	2,7	2,5	6	1,9	1,6	15	1,7	1,3	21
	σ_{11}	117	106	10	76,4	62,6	18	29,1	34	15
	σ_{22}	91	80,4	13	60,1	48,6	15	27,8	24	13
III	w	3,4	3,4	0	2,4	2,2	7	2	1,8	7
	σ_{11}	130	125	4	93,1	70,8	24	58	46,4	20
	σ_{22}	96,2	90,4	7	72,5	63	13	57,9	46,9	19
VI	w	1,6	1,4	10	0,9	0,7	22	0,8	0,6	23
	σ_{11}	119	121	1	64,5	55,6	13	53,7	43,6	19
	σ_{22}	78,5	81,7	4	46	37,6	18	39,8	31,1	21

При обчисленнях для пластин з жорстко защемленими краями використовувався метод скінченних елементів (табл.2).

Таблиця 2 – Значення прогинів і напружень для пластин V-VIII типів

Прогини w , мм; Напруження σ_{10} , МПа		Тип структури											
		V			VI			VII			VIII		
		Експеримент	Рівняння (2.20) [1]	Δ , %	Експеримент	Рівняння (2.20) [1]	Δ , %	Експеримент	Рівняння (2.20) [1]	Δ , %	Експеримент	Рівняння	Δ , %
w	2,2	2,0	10	1,3	1,2	8	2,1	1,9	13	1,1	1,1	0	
σ_{11}	верхнє волокно	-60,0	-59,9	0	-39,5	-40,2	6	-65,6	-58,2	13	-42,0	-44,6	6
	нижнє волокно	66,5	59,9	11	44,1	40,2	10	72,3	58,2	24	42,7	44,6	4
σ_{22}	верхнє волокно	-46,5	-42,6	9	-32,8	-28,9	6	-53,7	-40,8	31	-33,3	-27,2	23
	нижнє волокно	51,1	42,6	20	36,2	28,9	25	53,0	40,8	29	30,5	27,2	12

Проведені дослідження та аналіз їх результатів дозволяють рекомендувати для застосування у практичних розрахунках рівняння першого варіанту уточненої теорії шаруватих пластин та оболонок, який враховує вплив поперечного зсуву та нормального обтиснення шарів, їх ортотропію, довільну кількість і взаємне розташування за суттєвих відмінностей у товщинах і пружних властивостях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Александров А.Я. Расчет трёхслойных панелей / А.Я.Александров, А.Э.Брюккер, А.М.Куршин, А.П.Прусаков // – М.: Оборонгиз. – 1960. – 270 с.
2. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. – М.: Наука, 1974. – 446 с.
3. Григоренко Я.М., Василенко А.Т. Теория оболочек переменной жесткости. Методы расчета оболочек. – К.: Наукова думка, 1982. – Т.4. – 544 с.
4. Рассказов А.О., Соколовская И.И., Шульга Н.А. Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 191 с.
5. Рассказов О.О. Стійкість шаруваті замкненої сферичної оболонки під дією рівномірного зовнішнього тиску /О.О.Рассказов, О.Г.Бондарський // Вісник Національного транспортного університету. – 2010. – №21. – С.375-378.
6. Рассказов О.О. Порівняльний аналіз ефективності застосування деяких варіантів уточненої теорії пластин та оболонок на основі співставлення з точним розв'язком /О.О.Рассказов, О.Г.Бондарський // Вісник Національного транспортного університету. – 2012. – №26. – С.453-457.
7. Рассказов А.О. Экспериментальное исследование статики и динамики многослойных пластин / А.О. Рассказов, И.И.Соколовская // Прикл. механика. – 1981. – №17(2). – С. 65-70.
8. Khatua T.P., Cheung Y.K. Bending and Vibration of Multilayer Sandwich Beams and Plates // Int.I.Numer.Meth.Eng. – 1973. – №1. – P. 5-10.

REFERENCES

1. Aleksandrov A.Ya., Brukker A.Ye., Kurshin A.M., Prusakhov A.P. Calculation of three-layer panels – М.: Oboronhiz. – 1960. – 270 p.(Rus)
2. Ambartzumian S.A. The general theory of anisotropic shells. – М.: Nauka, 1974. – 446 p. (Rus)
3. Hruhorenko Ya.M., Vasylenko A.T. Theory of shells of variable stiffness. Methods of analysis of shells. – К.: Naukova dumka, 1982. –B.4. – 544 p. (Rus)
4. Rasskazov A.O., Sokolovskaia I.I., Shulha N.A. Theory and calculation of layered orthotropic plates and shells. – К.: Vyshcha shchkola Holovne izd., 1986. – 191 p. (Rus)
5. Rasskazov O.O. Bondarskyi O.H. Stability of layered closed spherical shell under uniform external pressure. Visnyk Natsionalnoho Transportnoho Universytetu. – 2010. –No. 21. – P.375-378. (Ukr)
6. Rasskazov O.O., Bondarskyi O.H. Comparative analysis of efficiency of application of some options of the specified theory of plates and shells based on a comparison with precise solution. Visnyk Natsionalnoho Transportnoho Universytetu. – 2012. –No. 26. – P.453-457. (Ukr)
7. Rasskazov A.O. Sokolovskaia I.I. Experimental study of statics and dynamics of multilayered plates. Prikl. Mekhanika. – 1981. – No. 17(2). – P.65-70. (Rus)
8. Khatua T.P., Cheung Y.K. Bending and Vibration of Multilayer Sandwich Beams and Plates//Int.I.Numer.Meth.Eng. – 1973. – No. 1. – P.5-10.(Eng)

РЕФЕРАТ

Рассказов О.О. Экспериментальні дослідження напружено-деформованого стану багатошарових пластин. / О.О. Рассказов, О.Г. Бондарський // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник: в 2 ч. Ч. 1: Серія «Технічні науки». – К. : НТУ, 2014. – Вип. 29.

В статті наведені результати експериментальних досліджень багатошарових пластин.

Об'єкт дослідження – прямокутні багатошарові пластини які складаються з різної кількості шарів та мають різне їх розміщення.

Мета дослідження – статистичний аналіз характеристик напружено-деформованого стану пластин.

Для розрахунків тонкостінних шаруватих конструкцій, які виконані із композиційних матеріалів застосовуються теорії які враховують вплив поперечного зсуву і нормального обтиснення шарів та їх ортотропію. В основу одного із варіантів прикладної теорії багатошарових пластин та оболонок покладені гіпотези про розподіл по товщині поперечних дотичних напружень, нормальних поперечних деформацій і поперечного нормального напруження для всього пакету в цілому. Для

встановлення меж застосування варіанту прикладної теорії проведені експериментальні дослідження напружено-деформованого стану багатослойових пластин різної структури за товщиною і при різних варіантах умов опирання. Статичні випробування проводились при защемленні та шарнірному опиранні по контуру, а також при защемленні та шарнірному опиранні по двом протилежним сторонам. Експериментально отримані значення прогинів та напружень порівнювалися з результатами обчисленими на основі рівнянь варіанту уточненої теорії.

Встановлено, що даний варіант уточненої теорії може бути застосований для практичних розрахунків багатослойових пластин та оболонок.

Результатами можуть бути упроваджені в інженерну практику при проектування та конструюванні шаруватих конструкцій.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта – пошук оптимальної структури багатослойового пакету пластини.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БАГАТОСЛОЙОВІ ПЛАСТИНИ, ЕКСПЕРИМЕНТ, ТЕОРІЯ, ЗАДАЧІ СТАТИЧНОГО ЗГИНУ.

ABSTRACT

Rasskazov O.O., Bondarskyi O.H. Experimental studies of the stress and strain state of multilayered plates. Visnyk National Transport University. Scientific and Technical Collection: In Part 2. Part 1: Series «Technical sciences». – Kyiv: National Transport University, 2014. – Issue 29.

The paper proposes the results of experimental studies of multilayered plates.

Object of the study – rectangular laminated plate consisting of different number of layers and having different placement.

The purpose of the study – a statistical analysis of the stress and strain state of plates.

For calculations of thin layered structures, which are made of composite materials are used theories that take into account the influence of transverse shear and normal compression layers and orthotropy. The basis of one of the options of applied multilayered plates and shells theory are placed hypotheses about the distribution of the thickness of the transverse shear stresses, transverse normal strain and transverse normal stress for the package as a whole. To establish the boundaries of application of applied theory there were experimental investigations of the stress and strain state of multilayer plates of different thickness and structure in different variants of resistance conditions. Static tests were carried out in conditions of restraint and swivel resistance of the contour and restraint and hinge resistance on two opposite sides. Experimentally obtained values of deflections and stresses were compared with the results calculated from equations based on version of the specified theory.

It was decided that this specified version of the theory can be applied for practical calculations of multilayer plates and shells.

The results can be implemented in engineering practice in the design and construction of layered structures.

Expected assumptions about the object development are a search for the optimal structure of multilayer plate package.

KEY WORDS: MULTILAYERED PLATES, EXPERIMENT, THEORY, PROBLEMS OF STATIC BENDING.

РЕФЕРАТ

Рассказов А.О. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния многослойных пластин. / А.О. Рассказов, А.Г. Бондарский // Вестник Национального транспортного университета. Научно-технический сборник: в 2 ч. Ч. 1: Серия «Технические науки». – К. : НТУ, 2014. – Вып. 29.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований многослойных пластин.

Объект исследования – прямоугольные многослойные пластины состоящие из разного количества слоев и имеющие различное их размещение.

Цель исследования – статистический анализ характеристик напряженно – деформированного состояния пластин.

Для расчета тонкостенных многослойных конструкций, выполненных из композиционных материалов применяются теории, учитывающие влияние поперечного сдвига и нормального обжатия слоев и их ортотропию. В основу одного из вариантов прикладной теории многослойных пластин и оболочек положены гипотезы о распределении по толщине поперечных касательных напряжений, нормальных поперечных деформаций и поперечного нормального напряжения для всего пакета в

целом. Для определения границ применения варианта прикладной теории проведены экспериментальные исследования напряженно – деформированного состояния многослойных пластин различной структуры по толщине и при различных вариантах условий опирания. Статические испытания проводились при защемлении и шарнирном опирания по контуру, а также при защемлении и шарнирном опирания по двум противоположным сторонам. Экспериментально полученные значения прогибов и напряжений сравнивались с результатами вычисленными на основе уравнений варианта уточненной теории .

Установлено, что данный рассматриваемый вариант уточненной теории может быть применен для практических расчетов многослойных пластин и оболочек.

Результатами могут быть внедрены в инженерную практику при проектировании и конструировании слоистых конструкций.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования – поиск оптимальной структуры многослойного пакета пластины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЛАСТИНЫ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ТЕОРИЯ, ЗАДАЧИ СТАТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ.

АВТОРИ:

Рассказов Александр Олегович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки, e-mail: lkolechko@yandex.ru, тел. +380442863889, Україна, 01010, Київ вул. Кіквідзе, 42, к. 608.

Бондарський Александр Георгійович, кандидат технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет, проректор з науково-педагогічної роботи, e-mail: prorector_npr@ukr.net, тел. +380332746133, Україна, 43018, Луцьк вул. Львівська, 75, к. 242.

AUTHORS:

Rasskazov Oleksandr O., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, National Transport University, head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, e-mail: lkolechko@yandex.ru, tel. +380442863889, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42, room 608.

Bondarskyi Oleksandr H., Ph.D., associate professor, Lutsk National Technical University, vice rector on scientific and pedagogical work, e-mail: prorector_npr@ukr.net, tel. +380332746133, Ukraine, 43018, Lutsk, Lvivska str. 75, room 242.

АВТОРЫ:

Рассказов Александр Олегович, доктор технических наук, профессор, Национальный транспортный университет, заведующий кафедры теоретической и прикладной механики, e-mail: lkolechko@yandex.ru, +380442863889, Украина, 01010, Киев, ул. Киквидзе, 42, к. 608.

Бондарский Александр Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, Луцкий национальный технический университет, проректор по научно-педагогической работе, e-mail: prorector_npr@ukr.net, тел. +380332746133, Украина, Луцк, ул. Львовская, 75, к. 242.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Шваб'юк В. І. доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет, професор кафедри технічної механіки, Луцьк, Україна.

Гуляев В.І. доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри вищої математики, Київ, Україна.

REVIEWER:

Shvabiuk V.I. Ph.D., Engineering (Dr.), professor, Lutsk National Technical University, professor of Technical Mechanics Department, Lutsk, Ukraine.

Huliaiev V.I. Ph.D., Engineering (Dr.), professor, National Transport University, head of Department of Higher Mathematics, Kyiv, Ukraine.