

2. Chislennyye metody v mekhanike [Numerical methods in mechanics]. / V.A. Bazhenov, A.F. Dashchenko, L.V. Kolomiets and others — Odessa, STANDART, 2005. — 563 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Усов А.В.

Поступила в редакцию 26 февраля 2013 г.

УДК 620.173:624.073

И.В. Павленко, магистр, Одес. нац. политехн. ун-т,
В.О. Курган, магистр, 3-д элеватор. оборудования,
г. Одесса

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН

И.В. Павленко, В.О. Курган. **Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану ортотропних пластин.** Виконано експериментальні дослідження ортотропної пластини при двох варіантах граничних умов і двох варіантах зовнішнього навантаження. Отримано результати порівнюються з результатами розрахунків методом скінченних елементів, а при шарнірному опиранні пластини по всьому контуру — з відомим аналітичним розв'язком у подвійних тригонометричних рядах.

Ключові слова: ортотропна пластина, експеримент, метод скінченних елементів, напруження, прогин.

И.В. Павленко, В.О. Курган. **Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния ортотропных пластин.** Выполнены экспериментальные исследования ортотропной пластины при двух вариантах граничных условий и двух вариантах внешней нагрузки. Полученные результаты сравниваются с результатами расчетов методом конечных элементов, а при шарнирном опирании пластины по всему контуру — с известным аналитическим решением в двойных тригонометрических рядах.

Ключевые слова: ортотропная пластина, эксперимент, метод конечных элементов, напряжение, прогиб.

I.V. Pavlenko, V.O. Kurgan. **Experimental studies of stress-strain state of orthotropic plates.** The experimental studies of an orthotropic plate are conducted under two variants of the border conditions and two variants of the external load. The obtained results are compared with the results calculated by the finite elements method, and under joint fastening of the plates on the whole sidebar — with the known analytical solution in double trigonometric rows.

Keywords: orthotropic plate, experiment, the finite elements method, stress, bending.

Развитие различных отраслей машиностроения, авиационно-космической техники, судостроения, строительства и др. ставит задачи расчета экономичных тонкостенных систем и, в частности, пластин.

При этом на современном этапе уровень развития производства характеризуется широким внедрением новых технологий производства высокопрочных материалов, обладающих ортотропными (ортогонально анизотропными) свойствами.

К таким материалам относятся стеклопластики, композиционные материалы, армированные последовательно чередующимися слоями волокон в двух взаимно перпендикулярных направлениях; клееные древесные плиты; листовые прокатные металлы, у которых при переходе в пластическую стадию работы, начинает проявляться анизотропия; и др.

Такое распространение материалов, обладающих анизотропными свойствами, породило широкомасштабные исследования в области механики анизотропных конструкций и, в первую очередь, пластин.

В силу определенных проблем математического характера получить аналитическое решение дифференциального уравнения изгиба ортотропной пластины удается не всегда [1]. Существенную роль играют условия закрепления краев пластины и локальные нагрузки. Широко применяются численные методы анализа, но здесь, как известно, нет универсального подхода. Каждый численный метод обусловлен необходимостью решения определенного круга задач и, имея те или иные достоинства, не лишен недостатков, часто принципиального характера, которые обуславливают границы его применения.

На этом фоне представляется эффективным использование численно-аналитического метода граничных элементов (ЧА МГЭ) [2]. Метод позволил получить фундаментальную систему решений дифференциального уравнения изгиба изотропных пластин без каких-либо ограничений на характер нагрузки и условия закрепления. Однако результаты расчетов требуют подтверждения каким-либо другим подходом и экспериментальными исследованиями изгиба ортотропных пластин.

Целью данной работы является исследование напряженно-деформированного состояния ортотропной пластины — плиты OSB (Oriented Strand Board, Ориентированно-стружечная плита — ОСП) — при ее изгибе.

При этом используется метод тензометрии, являющийся одним из наиболее эффективных способов экспериментального определения полей деформаций и напряжений в натуральных и модельных конструкциях [3...5].

Для имитации условий закрепления объекта исследования возникла необходимость создания двух разных испытательных стендов (рисунки 1, 2).



Рис. 1. Испытательные стенды: имитация шарнирного опирания по всему контуру (а), имитация условий жесткого защемления по трем сторонам и одной свободной грани (б)

Испытательный стенд 1 для имитации шарнирного опирания по всему контуру, состоит из деревянного каркаса высотой 100 мм и металлических пластин толщиной 2 мм, шириной 40 мм, закрепленных по внутреннему контуру на 10мм выше каркаса (рис. 1, а). Размеры образца — 500×500×8 мм. Каркас изнутри и с торца скреплен металлическими уголками, что обеспечивает жесткость конструкции.

Испытательный стенд 2, имитирующий условия жесткого защемления по трем сторонам и одной свободной грани, представляет собой деревянный каркас, три стороны которого высотой 100мм, а четвертая — 80мм, что позволяет получить свободную от опирания грань (рис. 1, б). Каркас собирается так же, как и в стенде 1. После установки пластина фиксируется при помощи металлических уголков длиной 500мм и размерами 30×30×3 мм, что позволяет имитировать жесткое защемление.

Распределенная нагрузка задается при помощи песка, который засыпается в деревянный каркас, а сосредоточенная — одноплечевым рычагом, состоящим из станины, шарнирно закрепленного на ней стержня (на который цепляется подвеска с грузами) и стержня, передающего усилие на объект исследования.

Разметка образцов и наклейка тензодатчиков проводится в соответствии со схемами (рис. 2).



Рис. 2. Размещение тензодатчиков: при шарнирном опирании пластины по всему контуру (а), при жестком защемлении пластины по трем сторонам и одной свободной грани (б)

С помощью балки равного сопротивления тарируются измерительные каналы установки. Проводится подпайка тензодатчиков и устанавливается клеммная колодка для контакта с измерительными приборами.

Испытания проводятся для определения напряжено-деформированного состояния (напряжения в характерных точках и прогиб в центре пластины) при двух типах нагрузки — сосредоточенной силе (рис. 3, а) и распределенной нагрузке по всему контуру (рис. 3, б). В обоих случаях рассматриваются два варианта граничных условий шарнирное опирание по всему контуру, а также жесткое защемление по трем сторонам и одна свободная грань.



Рис. 3. Нагружение пластины сосредоточенной силой (а) и распределенной нагрузкой (б)

Нагружение осуществляется ступенчато, с равномерным шагом. Контроль ведется по тензопреобразователям и индикаторам. Регистрация показаний тензодатчиков и индикаторов производится для каждого значения нагрузки. Для фиксирования изменений напряженно-деформированного состояния испытуемого образца используется стрелочный индикатор часового типа и измерительный тензометрический прибор ИДЦ-1. Результаты, полученные в ходе исследования напряженно-деформированного состояния пластины на натуральных стендах, приведены в таблицах 1...4.

Таблица 1

Напряжения и прогиб от сосредоточенной силы, приложенной в центре пластины, при жестком заземлении по трем сторонам и свободной четвертой

№ датчика	Величина нагрузки, Н				
	50	75	100	125	150
1	0,064	0,093	0,12	0,156	0,187
2	0,22	0,339	0,444	0,55	0,666
3	1,955	2,93	3,944	4,871	5,85
4	1,831	2,762	3,664	4,725	5,619
5	0,271	0,401	0,537	0,671	0,804
6	0,109	0,163	0,199	0,252	0,318
7	0,223	0,339	0,443	0,558	0,676
Прогиб, мм	0,35	0,54	0,71	0,90	1,08

Таблица 2

Напряжения и прогиб от сосредоточенной силы, приложенной в центре пластины, при шарнирном опирании по контуру

№ датчика	Величина нагрузки, Н				
	50	75	100	125	150
1	0,119	0,192	0,259	0,309	0,379
2	0,383	0,591	0,781	0,978	1,178
3	2,042	3,042	4,073	5,081	6,12
4	2,040	3,044	4,062	5,086	6,124
5	0,380	0,596	0,784	0,983	1,281
6	0,122	0,192	0,254	0,312	0,383
7	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006
Прогиб, мм	0,56	0,86	1,11	1,49	1,8

Таблица 3

Напряжения и прогиб от равномерно распределенной нагрузки при шарнирном опирании пластины по контуру

№ датчика	Величина нагрузки, Н/м ²				
	400	600	800	1000	1200
1	0,269	0,399	0,535	0,644	0,773
2	0,237	0,343	0,457	0,582	0,682
3	0,359	0,401	2,114	2,114	2,114
4	1,964	1,783	1,809	1,731	1,680
5	0,243	0,350	0,451	0,574	0,677
6	0,266	0,388	0,526	0,648	0,779
7	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004
Прогиб, мм	0,39	0,53	0,78	0,98	1,2

Таблица 4

Напряжения и прогиб от равномерно распределенной нагрузки при жестком закреплении пластины по трем сторонам и свободной четвертой

№ датчика	Величина нагрузки, Н/м ²				
	400	600	800	1000	1200
1	0,084	0,123	0,189	0,222	0,273
2	0,051	0,079	0,113	0,153	0,163
3	0,272	0,403	0,544	0,666	0,813
4	0,095	0,150	0,195	0,240	0,274
5	0,121	0,191	0,239	0,307	0,364
6	0,025	0,048	0,071	0,077	0,099
7	0,359	0,511	0,672	0,865	1,056
Прогиб, мм	0,21	0,31	0,40	0,51	0,6

С целью верификации результатов экспериментов выполнены расчеты пластины методом конечных элементов при тех же вариантах граничных условий и всех пошаговых значениях внешних нагрузок.

При этом в соответствии с техническими условиями на изготовление плит OSB задаются такие физические свойства материала:

- модули упругости — $E_X = 5500$ МПа, $E_Y = 5500$ МПа, $E_Z = 1500$ МПа;
- коэффициенты Пуассона — $\nu_{XY} = 0,01$, $\nu_{YZ} = 0,01$, $\nu_{XZ} = 0,01$;
- модули сдвига — $G_{XY} = 2750$ МПа, $G_{YZ} = 2750$ МПа, $G_{XZ} = 750$ МПа.

В таблицах 5...8 приводятся результаты вычисления напряжений в узлах конечно-элементной сетки, которые выбираются в соответствии с расположением тензодатчиков на пластине в проведенных экспериментах.

Таблица 5

Напряжения и прогиб от сосредоточенной силы, приложенной в центре пластины, при жестком закреплении трех сторон и свободной четвертой

№ датчика	Величина нагрузки, Н				
	50	75	100	125	150
1	0,059	0,089	0,119	0,149	0,179
2	0,219	0,329	0,439	0,548	0,658
3	1,945	2,918	3,891	4,863	5,836
4	1,827	2,741	3,654	4,568	5,481
5	0,264	0,396	0,528	0,660	0,793
6	0,102	0,154	0,205	0,256	0,307
7	0,220	0,330	0,440	0,550	0,660
Прогиб, мм	0,348	0,522	0,696	0,870	1,044

Таблица 6

Напряжения и прогиб от сосредоточенной силы, приложенной в центре пластины, при шарнирном опирании по контуру

№ датчика	Величина нагрузки, Н				
	50	75	100	125	150
1	0,123	0,185	0,247	0,309	0,371
2	0,389	0,584	0,779	0,973	1,168
3	2,031	3,047	4,063	5,079	6,095
4	2,031	3,047	4,063	5,079	6,095
5	0,389	0,584	0,779	0,973	1,168
6	0,123	0,185	0,247	0,309	0,371
7	0,00187	0,0028	0,00374	0,00467	0,00561
Прогиб, мм	0,563	0,845	1,127	1,408	1,69

Таблиця 7

Напряжения и прогиб от равномерно распределенной нагрузки при шарнирном опирании пластины по контуру

№ датчика	Величина нагрузки, Н/м ²				
	400	600	800	1000	1200
1	0,258	0,388	0,517	0,646	0,776
2	0,227	0,341	0,454	0,568	0,682
3	0,320	0,481	0,641	0,801	0,962
4	0,320	0,481	0,641	0,801	0,962
5	0,227	0,341	0,454	0,568	0,682
6	0,258	0,388	0,517	0,646	0,776
7	0,00128	0,00193	0,00257	0,00322	0,00386
Прогиб, мм	0,382	0,574	0,765	0,956	1,147

Таблиця 8

Напряжения и прогиб от равномерно распределенной нагрузки при жестком закреплении пластины по трем сторонам и свободной четвертой

№ датчика	Величина нагрузки, Н/м ²				
	400	600	800	1000	1200
1	0,085	0,128	0,171	0,214	0,257
2	0,054	0,082	0,109	0,136	0,164
3	0,267	0,401	0,535	0,669	0,802
4	0,096	0,145	0,193	0,241	0,290
5	0,122	0,183	0,245	0,306	0,367
6	0,030	0,045	0,061	0,076	0,091
7	0,345	0,518	0,69	0,863	1,036
Прогиб, мм	0,198	0,297	0,396	0,496	0,595

Сравнение результатов проведенных экспериментальных исследований (таблицы 5...8) с результатами расчетов в программе ANSYS [6] (таблицы 1...4) показали хорошую сходимость экспериментальных данных с расчетными, полученными методом конечных элементов. Максимальное расхождение по величинам напряжений составило 11 %, а по величине прогиба в центре пластины — 8 %.

Следует отметить, что аналитический расчет пластины с шарнирным опиранием по контуру методом двойных тригонометрических рядов, известный как метод Навье и рекомендуемый для расчета ортотропных пластин, дает большую погрешность по величине прогиба — 22 %, и еще более значительную — для величин напряжений (30...35 %), что вряд ли можно считать приемлемым для практического применения.

Литература

1. Амбарцумян, С.А. Теория анизотропных пластин / С.А. Амбарцумян. — М.: Наука, 1967. — 266 с.
2. Численно-аналитический метод граничных элементов / А.Ф. Дащенко, Л.В. Коломиец, В.Ф. Оробей, Н.Г. Сурьянинов. В 2 т. — Одесса: ВМВ, 2010. — Т. 1. — 416 с. — Т. 2. — 512 с.
3. Макаров, Р.А. Тензометрия в машиностроении / Р.А. Макаров. — М.: Машиностроение, 1975. — 288 с.
4. Писаренко, Г.С. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела / Г.С. Писаренко, В.А. Стрижало. — К.: Наук. думка, 1986. — 264 с.
5. Сурьянинов, Н.Г. Экспериментальные методы исследования в механике / Н.Г. Сурьянинов, А. М. Лимаренко, Г. А. Оборский. — Одесса: Астропринт, 2011. — 548 с.

6. Дашченко, А.Ф. ANSYS в задачах инженерной механики / А.Ф. Дашченко, Д.В. Лазарева, Н.Г. Сурьянинов; под ред. Н.Г. Сурьянинова. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Одесса: Пальмира, 2011. — 505 с.

References

1. Ambartsumyan, S.A. Teoriya anizotropnykh plastin [Theory of anisotropic plates] / S.A. Ambartsumyan. — Moscow, 1967. — 266 p.
2. Chislenno-analiticheskiy metod granichnykh elementov [Numerical-analytical boundary element method] / A.F. Dashchenko, L.V. Kolomiets, V.F. Orobey, N.G. Sur'yaninov. — Odessa, 2010. — Vol.1. — 416 p. — Vol.2. — 512 p.
3. Makarov, R.A. Tenzometriya v mashinostroenii [Strain measurement in engineering] / R.A. Makarov. — Moscow, 1975. — 288 p.
4. Pisarenko, G.S. Eksperimental'nye metody v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela [Experimental methods in solid mechanics] / G.S. Pisarenko, V.A. Strizhalo. — Kiev, 1986. — 264 p.
5. Sur'yaninov, N.G. Eksperimental'nye metody issledovaniya v mekhanike [Experimental research methods in mechanics] / N.G. Sur'yaninov, A.M. Limarenko, G.A. Oborskiy. — Odessa, 2011. — 548 p.
6. Dashchenko, A.F. ANSYS v zadachakh inzhenernoy mekhaniki [ANSYS in problems of engineering mechanics] / A.F. Dashchenko, D.V. Lazareva, N.G. Sur'yaninov; edited by N.G. Sur'yaninov. 2nd edition, corr. and enlarged. — Odessa, 2011. — 505 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Сурьянинов Н.Г.

Поступила в редакцию 12 июня 2013 г.