

послебифуркационного поведения будет определяться знаком коэффициента C_2 : если $C_2 > 0$ кривая зависимости λ/λ_{cr} от $\xi(u_1)$ поднимается выше критической точки бифуркации, имеем точку бифуркации первого типа, принадлежащую к устойчивой послебифуркационной (вторичной) равновесной кривой, в которой наблюдается потеря устойчивости исходной равновесной формы с сохранением несущей способности конструкции; если $C_2 < 0$ имеем критическую точку бифуркации второго типа, в которой конструкция теряет не только устойчивость исходной равновесной формы, но и несущую способность; если окажется, что вычисленное по приведенным выше формулам значение $C_2 = 0$, то в приведенных выше формулах нужно учесть слагаемые более высокого порядка относительно ξ .

Библиографический список:

1. ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-87). Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. Введ. с 01.07.88. -М.: Изд-во стандартов, 1988. -9 с.
2. Броуде Б.М., Бельский Г.И., Беляев Б.И. О потере устойчивости как предельном состоянии стальных конструкций //Строит. механика и расчет сооружений. -1990. -№3. -С.88-91.
3. Совершенствование нормирования расчета строительных конструкций и оснований. Райзер В.Д., Бать А.А., Отставнов В.А., Сухов Ю.Д. //Строит. механика и расчет сооружений, 1988. -№3. -С.59-61.
4. Райзер В.Д., Муртазалиев Г.М. Закритические равновесные состояния пологих оболочек вращения //Строит. механика и расчет сооружений.-1980. -№1. -С.40-45.
5. Муртазалиев Г. М. Методы теории катастроф в задачах устойчивости оболочек. ДГТУ, Махачкала. 2004 год. 176 с.
6. Koiter W.T. General theory of shell stability /In:Olszak W. (ed.). Thin shell theory. New trends and applications. Berlin: Springer Verlag, 1980. -P.63-87.
7. Koiter W.T. The application of the initial postbuckling analysis to shells //Buckling Shells. Proc. State - of- the Art. Colloq., Univ. Stuttgart. -Berlin e. a., 1982. -P.3-11.

УДК 539.3

Устарханов О.М., Алибеков М.С., Устарханов Т.О.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ БАЛКИ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ПИРАМИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Ustarkhanov O.M., Alibekov M.S., Ustarkhanov T.O.

THE STRESS-STRAIN STATE OF SANDWICH BEAM WITH A HONEYCOMB CORE PYRAMIDAL SHAPE UNDER STATIC LOADING

Работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям напряженно деформированного состояния трехслойных балок с сотовым заполнителем пирамидальной формы при статическом нагружении. Данные теоретические и экспериментальные исследования позволяют использовать их при проектировании трехслойных конструкций в космической и авиационной технике, а так же в строительстве и машиностроении, что представляет интерес для инженерно-технических работников и проектировщиков.

Ключевые слова: трехслойная балка, сотовый наполнитель, статическое нагружение, шарнирное опирание.

The work is devoted to theoretical and experimental studies of the stress strain state of sandwich beams with honeycomb pyramidal shape under static loading. These theoretical and experimental studies allow to use them in the design of sandwich structures in the aerospace, aeronautical engineering, as well as in the construction and engineering industry, which is of interest to engineers, technicians and designers.

Key words: three-layer beam, honeycomb, static load, the swivel bearing.

Целью данной статьи является определение напряженно-деформированного состояния (НДС) трехслойной конструкции (ТК) с пирамидальным сотовым наполнителем. Для определения НДС используются апробированные теоретические зависимости и графики и сравниваются с экспериментальными характеристиками НДС.

В случае получения удовлетворительных результатов - совпадения теоретических расчётов ТК, выполняемых с использованием методик, приведённых в [1], с экспериментальными данными можно сделать вывод, что полученные в [2] расчётные зависимости для определения параметров пирамидального наполнителя являются достаточно корректными.

В качестве примера рассматривается трёхслойная балка с сотовым наполнителем, шарнирно опертая по концам и нагруженная равномерно распределённой нагрузкой (рис.1).

При этом, рассматривались три варианта трехслойных балок со следующими размерами сот : а) $C = 0,05$ м, $a \times a = 0,03 \times 0,03$ м; б) $C = 0,07$ м, $a \times a = 0,04 \times 0,04$ м; в) $C = 0,08$ м, $a \times a = 0,04 \times 0,04$ м., (где C - высота сотового наполнителя, a - размер основания сотового наполнителя), длина трехслойной балки (ТБ) равнялась: $L = 0,45$ м, $L = 0,64$ м, $L = 0,72$ м

В качестве материала наполнителя была принята алюминиевая фольга с толщиной $t_{ст} = 10^{-4}$ м. Материалом для несущих слоёв ТК служил алюминиевый сплав АМГ6М толщиной $t = 1,5 \times 10^{-3}$ м.

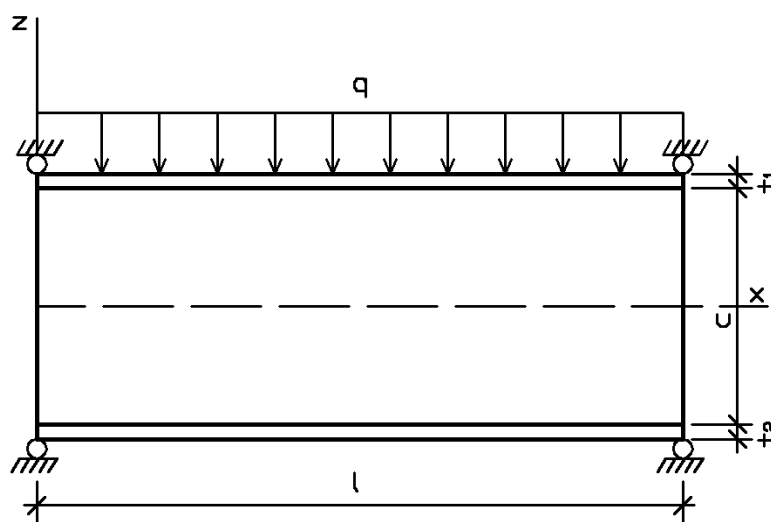


Рисунок 1 - Трёхслойная балка, шарнирно опертая по концам и нагруженная равномерно распределённой нагрузкой

Для трёхслойной балки, с шарнирным опиранием по концам определялись по [1]:

1. Наибольший прогиб балки в сечении $x = \frac{l}{2}$

$$\omega = \frac{qx}{2B_{TP}(h_2 - h_1)^2} \left[l \left(\frac{cB_{TP}}{G_{\text{хоз3}}} + \frac{l^2}{2} \right) - \frac{cB_{TP}}{G_{133}} x - \frac{lx^2}{6} + \frac{x^3}{12} \right] = \frac{ql^2}{8B_{TP}(h_2 - h_1)^2} \left(\frac{cB_{TP}}{G_{133}} + \frac{5l^2}{48} \right)$$

,

2. Максимальные нормальные напряжения в верхнем несущем слое в сечении $x = \frac{l}{2}$

$$\sigma_{12 \max} = \frac{q\bar{B}_2}{2B_{TP}(h_2 - h_1)^2} \left(\frac{cB_{TP}}{G_{133}} - \frac{l^2}{8} \right) - \frac{qcB_{TP}}{(h_2 - h_1)t_2G_{133}},$$

3. Напряжения в середине поверхности верхнего несущего слоя в сечении $x = \frac{l}{2}$

$$\sigma_{12 \text{cp}} = \frac{ql^2}{[8t_2(h_2 - h_1)]},$$

4. Касательные напряжения в заполнителе в сечении $x = 0, l$ (в сечении

$$x = \frac{l}{2} \quad \tau_{133} = 0)$$

$$\tau_{133} = \pm \frac{ql}{2(h_2 - h_1)} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{ql}{C + \frac{(t_1 + t_2)}{2}},$$

где q – равномерно распределённая по пролёту балки нагрузка;

l – длина балки;

$$h_1 = \frac{t_1(1 + \xi_1)}{2};$$

$$h_2 = -\frac{t_2(1 + \xi_2)}{2};$$

t_1, t_2 – толщина наружных несущих слоёв,

$$\xi_1 = \frac{c}{t_1}; \quad \xi_2 = \frac{c}{t_2};$$

c – высота заполнителя,

$$B_{TP} = \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2}; \quad B_1 = \frac{E_1 t_1}{1 - \nu_1^2}; \quad B_2 = \frac{E_2 t_2}{1 - \nu_2^2};$$

E_1, E_2 – модуль упругости внешних несущих слоёв,

ν_1, ν_2 – коэффициент Пуассона несущих слоёв,

G_{133} – модуль сдвига заполнителя

$$\bar{B}_2 = \frac{2B_{TP}(h_2 - h_1) + t_2 B_2}{t_2}$$

В таблице 1.1, приведен результат расчета на поперечный изгиб трехслойной балки с шарнирным опиранием по концам.

Распределённая нагрузка во всех случаях нагружения менялась от 1 до 10 КПа.

Теоретические расчёты показали, что такие параметры ТБ как ω ,

$\sigma_{12 \max}$ и $\sigma_{12 \text{cp}}$ для шарнирного опирания концов находятся в линейной зависимости от распределённой нагрузки и нелинейной от длины ТБ. Касательное напряжение τ_{133} линейно от распределённой нагрузки и длины ТБ.

Для испытания трехслойных конструкций стандартом установлены геометрические и прочностные параметры, методы изготовления, обработки и испытания ТК с сотовым наполнителем различной формы ячеек [3-7].

Для экспериментальной проверки теоретических расчетов были испытаны на поперечный изгиб трехслойные балки с сотовым наполнителем пирамидальной формы. При этом нагружение осуществлялось с помощью специальных устройств и приспособлений, с равномерно распределенной нагрузкой.

Наиболее приемлемым как с точки зрения реализации, так и с точки зрения обеспечения равномерной нагрузки на образец, следует принять метод создания давления воздухом или жидкостью (например, водой).

В данном эксперименте равномерно распределенное нагружение осуществлялось давлением воздуха. Принципиальная схема установки приведена на рис.2.

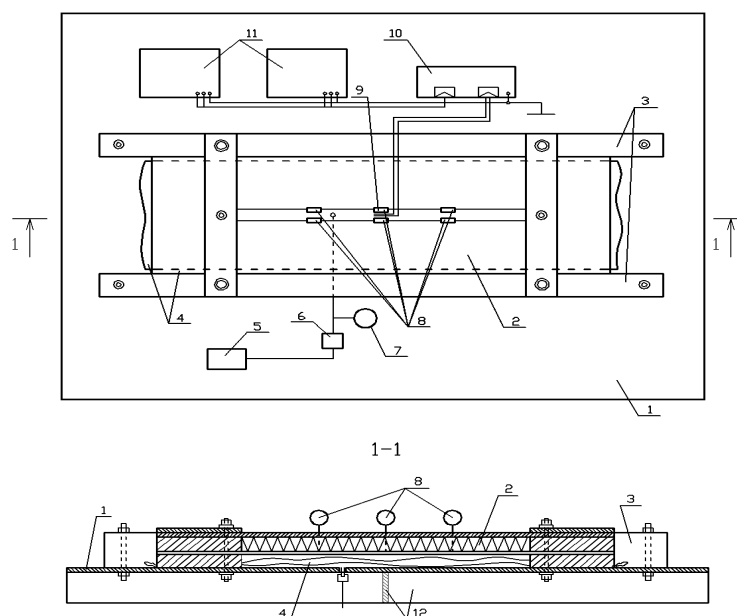


Рисунок 2 - Принципиальная схема установки для поперечного изгиба трехслойной балки

Установка собрана на основе стальной плиты 1 с ребрами жесткости, расположенными на нижней стороне. Испытываемые трехслойные балки устанавливались на плите между ограничивающими металлическими брусками 3, закрепленными на плите 1. Между плитой и балкой располагалась камера 4 из эластичного материала. Давление в камере создавалось компрессором 5 типа СО27Б через редуктор 6 и измерялось образцовым манометром 7 типа ОБМ-0.6. Очевидно, что давление в камере равномерно передается балке. Измерение деформации балки осуществлялось при помощи стрелочных индикаторов 8- часового типа ИЧ в трех точках, вдоль балки. При этом индикаторы располагались на верхнем и нижнем несущих слоях трехслойной балки. Контакт индикаторов с нижней гранью осуществлялся с помощью иглы, опущенной через отверстие диаметром 0.5 мм. Такое отверстие практически не сказывается на прочностных характеристиках образцов.

Измерение деформаций несущих слоев осуществлялось с помощью тензодатчиков 9, наклеенных на несущие слои трехслойной балки. Тензодатчики подключались по полумостовой схеме к усилителю 10 «Топаз». Регистрация выходных сигналов с усилителя производилась самописцем 11 «Эндим 621.02». Таким образом осуществлялась непрерывная регистрация деформаций.

Таблица 1 - Теоретические исследования шарнирно опертой по краям ТБ с пирамидальным наполнителем из алюминиевой фольги при поперечном изгибе

Распределенная нагрузка (КПа)	Алюминиевая фольга											
	L=0.45 м				L=0.64 м				L=0.72 м			
	ω (мм)	$\sigma_{12\max}$ (МПа)	σ_{12cp} (МПа)	τ_{133} (КПа)	ω (мм)	$\sigma_{12\max}$ (МПа)	σ_{12cp} (МПа)	τ_{133} (КПа)	ω (мм)	$\sigma_{12\max}$ (МПа)	σ_{12cp} (МПа)	τ_{133} (КПа)
1	0.0042	0.316	0.328	4.369	0.0087	0.466	0.477	4.48	0.011	0.519	0.53	4.42
2	0.0084	0.633	0.655	8.738	0.017	0.931	0.955	8.95	0.021	1.04	1.06	8.83
3	0.0125	0.943	0.983	13.11	0.026	1.400	0.143	13.4	0.032	1.56	1.59	13.3
4	0.0167	1.270	1.311	17.48	0.035	1.860	1.910	17.9	0.042	2.08	2.12	17.7
5	0.021	1.582	1.638	21.85	0.044	2.33	2.39	22.4	0.053	2.59	2.65	22.1
6	0.025	1.899	1.966	26.21	0.052	2.79	2.86	26.9	0.063	3.11	3.18	26.5
7	0.029	2.215	2.294	30.58	0.061	3.26	3.34	31.3	0.074	3.63	3.71	30.8
8	0.0334	2.531	2.621	34.95	0.070	3.73	3.82	35.8	0.085	4.15	4.24	35.3
9	0.038	2.848	2.949	39.32	0.078	4.19	4.30	40.3	0.095	4.67	4.77	39.8
10	0.042	3.164	3.277	43.69	0.087	4.66	4.77	44.8	0.106	5.13	5.3	44.2

Таблица 2 - Экспериментальные исследования прочности жестко заземленной по кромкам ТБ с пирамидальным наполнителем из алюминиевой фольги при поперечном изгибе

Распределенная нагрузка (КПа)	Алюминиевая фольга											
	L=0.45 м				L=0.64 м				L=0.72 м			
	ω , прогиб балки (мм)	Расхождение между теор. и эксперим. данными	σ_{12max} Напряж. в верхн. несущ. слое (МПа)	Расхождение между теор. и эксперим. данными	ω , прогиб балки (мм)	Расхождение между теор. и эксперим. данными	σ_{12max} Напряж. в верхн. несущ. слое (МПа)	Расхождение между теор. и эксперим. данными	ω , прогиб балки (мм)	Расхождение между теор. и эксперим. данными	σ_{12max} Напряж. в верхн. несущ. слое (МПа)	Расхождение между теор. и эксперим. данными
1	0.005	16.56	0.3769	15.97	0.010	13.66	0.5355	13.04	0.0128	17.42	0.6121	15.25
2	0.010	16.56	0.7350	13.81	0.0198	11.93	1.0657	12.61	0.023	8.09	1.1569	10.32
3	0.014	10.6	1.0404	8.66	0.030	12.8	1.6386	14.75	0.0384	17.42	1.867	16.64
4	0.019	12.17	1.447	12.47	0.041	14.93	2.142	13.04	0.050	15.44	2.4486	15.25
5	0.027	22.74	1.9224	17.62	0.053	17.74	2.7311	14.75	0.065	18.69	3.1219	16.92
6	0.029	13.68	2.1976	13.52	0.058	9.79	3.1541	11.42	0.071	10.68	3.6606	14.92
7	0.037	21.07	2.6763	17.15	0.070	12.92	3.7967	14.15	0.090	18.33	4.3768	17.03
8	0.041	18.6	3.0532	17.00	0.083	15.95	4.2787	12.94	0.099	14.67	4.891	15.15
9	0.043	16.56	3.3548	15.02	0.089	11.82	4.8189	13.03	0.111	14.3	5.5031	15.16
10	0.051	18.2	3.8259	17.21	0.104	16.15	5.4621	14.75	0.119	11.18	5.9989	13.52

Испытанию подверглись три серии балок высотой сотового заполнителя 5, 7 и 8 см, с площадью основания отдельных ячеек 3x3 см², 4x4 см². Длины балок: 45 см (для заполнителя с высотой 5 см); 64 см (для заполнителя с высотой 7 см); 72 см (для заполнителя с высотой 8 см). Несущие слои балки изготовлены из сплава АМГ6М и вся трехслойная балка собиралась с помощью эпоксидного клея ЭД-20. Эксперименты производились при шарнирном опирании трехслойных балок по сторонам. Давление воздуха при испытаниях изменялось от 0 до 10⁴ Па. Во время проведения эксперимента одновременно измерялись смещение концов балки и расстояния между несущими слоями. Нагрузка изменялась в пределах упругости балки, т.е. после снятия нагрузки остаточная деформация балки не наблюдалась.

Сравнительные данные теоретических и экспериментальных исследований деформаций трехслойных балок и напряжений, возникающих в верхнем несущем слое при поперечном изгибе, приведены в таблицах 1 и 2.

При испытании балок, заземленных по кромкам с пирамидальным заполнителем из алюминиевой фольги, расхождение прогибов между теоретическими и экспериментальными данными не превышало 18%.

Аналогичное различие наблюдалось между теоретическими и экспериментальными данными напряжений в несущем слое.

Анализ сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований показал, что полученные в [2] расчётные зависимости для определения параметров пирамидального заполнителя являются достаточно корректными для инженерных расчетов.

Библиографический список:

1. Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. Расчет трехслойных конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 304 с.
2. Кобелев В.Н., Батдалов М.М., Устарханов О.М., Новиков В.Н. Приведенные характеристики конического заполнителя для трехслойной конструкции, известия северо-кавказского научного центра высшей школы, 1988. С. 66-74.
3. Берсудский В.Е., Крысин В.Н., Лесных С.И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. М., 1975.
4. Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. М., 1986.
5. Камошильский В.П. Экспериментальное изучение устойчивости сжато-изогнутых трехслойных пластин за пределами пропорциональности, авионика. 1972. №15(1). С.105-108.
6. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. М., 1982.
7. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: Справочник. М., 1991.