

Д. Н. Незванов, В. И. Солонин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
ВАФЕЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Несмотря на большую практическую важность экспериментального изучения устойчивости подкрепленных конструкций, в настоящее время имеется недостаточное количество опытов по осевому сжатию вафельных цилиндрических оболочек. В данной работе приводятся результаты испытаний на сжатие 15 вафельных и 2 гладких модельных оболочек. Оболочки были изготовлены из листового материала АМг6-Н путем вальцовки и последующей сварки полуобочаек. На поверхности оболочек производилось местное химическое травление ячеек, в результате чего формировалась сетка продольно-кольцевых ребер, т.е. структура подкрепления, обычно называемая "вафельной". Геометрические характеристики исследованных оболочек приведены в таблице I. Большинство оболочек было выполнено с внутренними подкреплениями, а две (№ I4 и № I5) - с наружными. Все оболочки имели внешний диаметр 660 мм и длину 800 мм. Размер ячеек был также постоянным - 30x30 мм, варьировались лишь поперечные сечения ребер. Основная группа оболочек (№№ I-8) имела ребра высотой 3,5-3,9 мм. Оболочки №№ 9, 10, 11 отличались большей высотой, а №№ 12, 13 - большей шириной подкреплений. Для сопоставления были также изготовлены 2 гладкие оболочки (№ I6 и № I7). Обмеры, проведенные перед испытаниями, показали, что непрямолинейность образующих у оболочек не превышает 1 мм, а разнотолщинность высоты ребер составляет 0,1-0,3 мм. Разнотолщинность полотна у некоторых оболочек в силу нестабильности процесса травления достигала 0,4-0,6 мм. Размеры контура ячеек в отдельных зонах тоже имели значительные разбросы (до 2-4 мм). В связи с этим для определения фактических ра-

змеров оболочек обмеры производились по 60-70 точкам с последующим осреднением результатов.

Механические свойства материала оболочек, полученные по результатам испытаний образцов, вырезанных из зон припусков, составили

$$\sigma_{\delta} = 4200 \text{ кг/см}^2, \sigma_{0,2} = 3160 \text{ кг/см}^2, E = 7,1 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2.$$

Таблица I

№ обол.	Высота ребер мм	Толщина полотна мм	Ширина ребер		Площадь попереч. сечения см <sup>2</sup>
			продольн. мм	кольцев. мм	
I	3,87	1,03	2,46	3,28	28,6
2	3,68	0,84	2,07	2,79	23,9
3	3,68	0,94	2,97	3,48	27,3
4	3,50	0,85	1,90	2,70	23,2
5	3,46	0,78	2,15	2,95	22,3
6	3,60	0,95	2,50	3,00	26,4
7	3,50	0,85	1,90	2,80	23,2
8	3,85	0,97	2,35	3,05	27,2
9	4,62	0,91	3,22	4,02	31,2
10	4,75	1,03	4,45	5,04	36,9
II	4,74	1,33	5,52	5,74	44,0
12	3,74	0,97	4,45	5,14	30,9
13	3,65	0,82	3,55	4,15	26,3
14	3,78	0,89	2,68	3,37	26,3
15	3,56	0,88	1,96	2,67	24,0
16	-	0,75	-	-	15,6
17	-	0,88	-	-	18,2

Нагружение оболочек осуществлялось на 200-тонном гидравлическом прессе. Схема нагружения показана на рис. I. Для обеспечения равномерного сжатия усилие от пресса передавалось на оболочки через сферические опоры и нагрузочные плиты. Последние пристыковались болтами к шпангоутам, приваренным по торцам оболочек. Внутреннее давление в оболочках создавалось водой. Герметичность стыков обеспечивалась резиновыми прокладками.

На осевое сжатие без внутреннего давления было испытано 8 оболочек. За нагрузку потери устойчивости принималась максимальная нагрузка, предшествовавшая падению сжимающей силы. У всех испытанных оболочек потеря устойчивости произошла хлопком. Характер волнообразования у вафельных и гладких оболочек был аналогичным — появлялась группа ромбических складок, несколько вытянутых в осевом направлении и направленных внутрь оболочки (асимметричная форма потери устойчивости). Образование складок чаще всего происходило в торцовых зонах вблизи шпангоутов, а у некоторых оболочек — в центральной части. В таблице 2 приведены величины нагрузок по потери устойчивости  $T$ , зафиксированные при испытаниях, и соответствующие этим нагрузкам значения средних меридиональных напряжений  $\sigma$ .

Таблица 2.

№ об.	T кг	$\sigma$ кг/см <sup>2</sup>	$T/G \cdot 10^3$ —
I	40600	1420	5,15
2	32800	1370	4,87
IO	83000	2250	7,54
II	85000	1930	6,85
I2	54000	1750	6,11
I4	33500	1270	4,50
I6	3500	225	1,04
I7	6000	329	1,52

Уровнем этих напряжений  $\sigma$ . Уровень этих напряжений позволяет судить об эффективности подкреплений. Например, у вафельных оболочек № I, 2 и I4 напряжения потери устойчивости в 4–6 раз выше, чем у гладких. Оболочки с более мощными подкреплениями (№ IO, II, I2) выдерживают ещё большие напряжения. В таблице 2 приведены также отношения усилий  $T$  к весу оболочек  $G$ , показывающие сравнительное весовое со-

вершенство испытанных моделей.

На осевое сжатие с внутренним давлением было испытано 9 оболочек. Потеря устойчивости у всех оболочек произошла хлопком, складки возникали вблизи торцовых шпангоутов. Характер волнообразования здесь также был аналогичен гладким оболочкам и изменял-

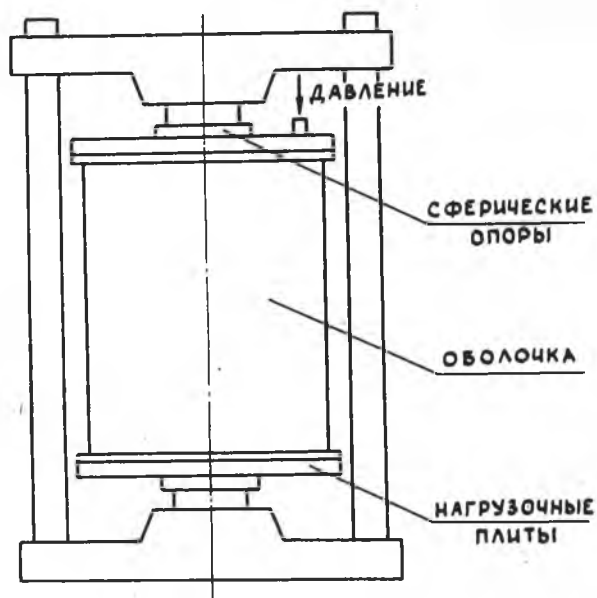


Рис. I

ся в зависимости от величины внутреннего давления. При  $p = 1 \text{ кг/см}^2$  и  $p = 2 \text{ кг/см}^2$  форма складок была такой же, как у оболочек без внутреннего давления. При  $p = 3 \text{ кг/см}^2$  наряду с такой формой появились вытянутые в окружном направлении складки, направленные преимущественно выпуклостью наружу. При большем давлении имели место только вытянутые складки выпуклостью наружу, соответствующие осесимметричной форме потери устойчивости.

Значения нагрузок потери устойчивости  $T$ , полученные при испытаниях, сведены в таблицу 3. Там же приведены растягивающие усилия разгрузки  $T_p$ , вызванные внутренним давлением, суммарные сжимающие усилия  $T - T_p$ , величины средних меридиональных сжимающих напряжений  $\sigma$  при потере устойчивости и отношения  $T - T_p / G$ . Сопоставление с таблицей 2 показывает, что внутреннее давление повышает несущую способность вафельных оболочек при осевом сжатии. Однако нужно отметить, что эффект повышения несущей способности

Таблица 3.

№ № об.	$\rho$ кг/см <sup>2</sup>	$T$ кг	$T_p$ кг	$T - T_p$ кг	$G$ кг/см <sup>2</sup>	$\frac{T - T_p}{G \cdot 10^3}$
3	5	72000	17100	54900	2010	7,21
4	1	35800	3400	32400	1400	5,02
5	4	51000	13700	37300	1670	5,89
6	3	56000	10300	45700	1740	6,39
7	3	49600	10300	39300	1700	6,07
8	2	56500	6800	49700	1820	6,56
9	4	92500	13700	78800	2520	8,34
13	3	65000	10300	54700	2080	7,19
15	4	50000	13700	36300	1510	5,49

Таблица 4.

№ № об.	$\rho$ кг/см <sup>2</sup>	$G^3$ кг/см <sup>2</sup>	$G^8$ кг/см <sup>2</sup>	$G^H$ кг/см <sup>2</sup>
1	0	1420	2420	1010
2	0	1370	2240	960
3	5	2010	3110	2270
4	1	1400	2320	1360
5	4	1670	2840	2120
6	3	1740	2760	1860
7	3	1700	2660	1860
8	2	1820	2740	1720
9	4	2520	3660	2530
10	0	2250	3270	1410
11	0	1930	3370	1370
12	0	1750	2600	1090
13	3	2080	2970	2050
14	0	1270	3510	1100
15	4	1510	3050	1960
16	0	225	977	294
17	0	329	1140	344

щей способности с ростом давления проявляется у вафельных оболочек слабее, чем у гладких.

В таблице 4 дано сопоставление результатов испытаний с расчетами. Приведены экспериментальные величины напряжений потери устойчивости  $\sigma^3$ , вычислены верхние критические напряжения асимметричной формы складкообразования  $\sigma^6$  и нижние критические напряжения  $\sigma^H$ . Расчеты проводились по методике, изложенной в работе [1]. При определении  $\sigma^H$  аппроксимирующее выражение для радиального прогиба оболочки принималось в форме, соответствующей известному решению Кемпнера.

Приведенные в таблице 4 данные показывают, что у всех испытанных оболочек фактические напряжения потери устойчивости значительно ниже верхних критических значений и близки к нижним критическим напряжениям. При практических расчетах на устойчивость использование в качестве критических напряжений величин  $\sigma^6$  или  $\sigma^H$  требует введения соответствующих поправочных коэффициентов, учитывающих результаты экспериментов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Д.Н.Незванов, Х.С.Хазанов. Исследование области неустойчивости вафельной цилиндрической оболочки. "Вопросы прочности элементов авиационных конструкций", Межвузовский сборник, вып.2 изд.КуАИ, 1975.