

УДК 620.179.12:629.7

С. И. Ткаченко

### НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Неразрушающим испытаниям элементов конструкций посвящается в настоящее время все большее число работ. Чаще всего прогнозирование разрушающих нагрузок основывается на экстраполяции зависимости напряжений от внешней нагрузки на каждом этапе нагружения в сравнении напряжений с предельными величинами. В случае работы конструкции на устойчивость в качестве предельных можно взять критические напряжения, полученные расчетным путем ( $\sigma_{кр}^p$ ). Реальные конструкции обладают технологическими несовершенствами, что приводит к известным трудностям в определении  $\sigma_{кр}^p$ . Поскольку надежный прогноз получается при уровне нагружения порядка 90–95% от разрушающей нагрузки, то данный метод не всегда приемлем из-за слишком грубой оценки  $\sigma_{кр}^p$ .

Другой способ, не требующий определения  $\sigma_{кр}^p$ , основан на анализе получаемых экспериментально некоторых величин, характеризующих жесткость системы в процессе нагружения. В последние годы развивается так называемый  $F/S$ -метод [1], представляющий собой обобщение известного метода Саусвелла [2–4]. В  $F/S$ -методе строится зависимость между жесткостным параметром  $F/S$  и нагрузкой  $F$ . В качестве  $S$  можно брать значения деформаций в выбранных заранее точках либо другие параметры, характеризующие уровень деформирования конструкции. Критическая нагрузка определяется путем экстраполяции кривой  $F/S(F)$  до пересечения ее с "предельной" прямой, в качестве которой берется прямая линия, проходящая через начало координат и составляющая некоторый угол  $\alpha$  с осью  $F$ . Величина этого угла зависит от свойств материала и характера потери устойчивости (местная или общая). В случае общей потери устойчивости

в качестве предельной прямой берется ось  $F$ , а при местной тангенс угла наклона предельной прямой вычисляется по формуле  $tg\alpha = \frac{1}{\epsilon_{np}}$ , где  $\epsilon_{np}$  - характерная для данного материала предельная деформация, определяемая экспериментально. Точность и надежность прогноза в  $F/S$ -методе существенно зависит от удачного выбора параметра  $S$  и величины  $\epsilon_{np}$ .

Настоящая работа посвящена применению  $F/S$ -метода к исследованию устойчивости цилиндрических оболочек.

Испытаниям подвергались цилиндрические оболочки, выточенные на токарном станке, радиуса  $R = 90$  мм с отношением длины к радиусу  $L/R = 2$ . Пять оболочек были выполнены из сплава АМг6 ( $E = 70$  ГПа) с номинальной толщиной  $h = 0,9$  мм, пять других оболочек - из сплава Д16АТ, закаленного и естественно состаренного ( $E = 72$  ГПа), с номинальной толщиной  $h = 0,7$  мм. Толщина каждой оболочки была промерена в 12 точках; минимальные  $h_{min}$  и средние  $h_{cp}$  значения толщины приведены в таблице I.

Таблица I

№ обр.	Материал	$h_{min}$ мм	$h_{cp}$ мм	$F^{кр}$ кН	$F^{окр}$ кН	$F^{*кр}$ кН	$F_{кр}$ кН	Погр. %	$\epsilon_{np}$ %
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	АМг6	0,80	0,95	97,3	59,6	74,4	80,0	-7,0	0,231
2	АМг6	0,70	0,91	71,1	44,6	77,9	70,0	+11,2	0,170
3	АМг6	0,78	0,88	90,7	79,2	82,1	85,0	-3,4	0,195
4	АМг6	0,86	1,05	113,1	98,2	85,4	96,0	-11,2	0,235
5	АМг6	0,80	0,85	97,3	90,0	84,8	90,0	+5,8	0,214
6	Д16АТ	0,62	0,70	55,1	31,9	50,3	47,0	+7,1	0,178
7	Д16АТ	0,60	0,69	51,1	57,1	63,5	67,0	-5,2	0,211
8	Д16АТ	0,60	0,66	51,1	49,8	51,4	50,0	+2,8	0,199
9	Д16АТ	0,60	0,64	51,1	42,6	43,6	47,0	-7,2	0,233
10	Д16АТ	0,62	0,71	55,1	53,8	55,0	51,0	+7,8	0,187

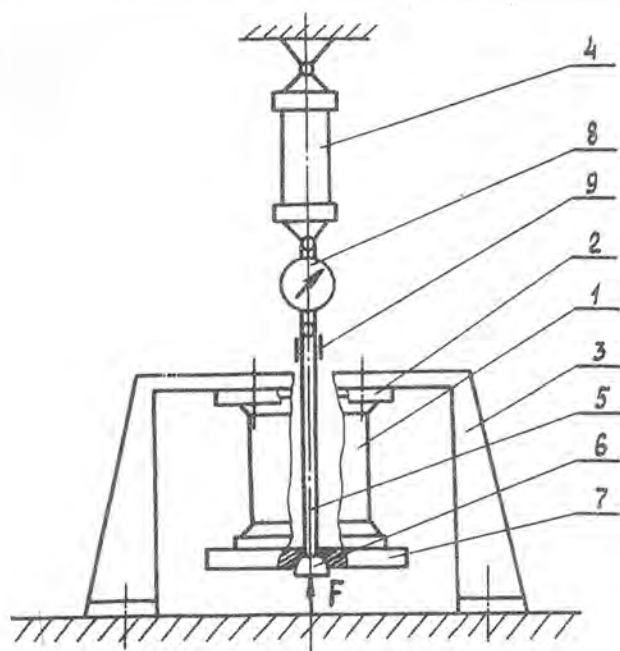


Рис. 1

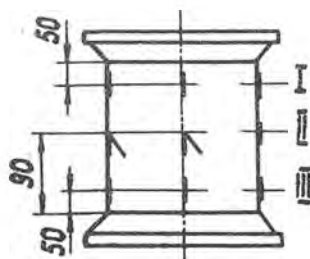


Рис. 2

Нагружение образцов осуществлялось с помощью устройства, показанного на рис. 1. Образец 1 закреплялся направляющими полукольцами 2 на станине 3, жестко связанной с силовым полом. Усилие  $F$ , создаваемое силовозбудителем 4, посредством штока 5, снабженного сферическим шарниром 6, передавалось на образец через плиту 7 и измерялось динамометром 8. Для дополнительного контроля нагрузки на штоке 5 имелись тензовставки 9. В качестве чувствительных элементов для замера деформаций применялись тензодатчики типа ЭПКБ-10-200ХВ, наклеиваемые клеем "ЦИАКРИН-Э0" по схеме, показанной на рис. 2. Датчики I и III групп общим числом 16 штук наклеивались по образующим попарно на внешней и внутренней поверхностях оболочек; кроме того, на внешней поверхности располагались четыре розетки (группа II), которые в процессе испытаний использовались для контроля главных напряжений в оболочке. Сбор информации о напряженном состоянии образцов в ходе нагружения проводился с помощью комплекса, включающего в себя тензоблок К732/1, мини-ЭВМ 15ВСМ-5, блок интерфейсных карт и печатающее устройство "Consult".

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Нагружение производилось ступенчато. На первых ступенях нагрузка возрастала на величину не более  $0,1F^P$  кр, где [5]:

$$F_{кр}^P = 2\pi R h_{min} \sigma_{кр}^P,$$

$$\sigma_{кр}^P = K \frac{E h_{min}}{R}, \quad (1)$$

$$K = 0,606 - 0,546 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{h_{min}}}\right) \right].$$

На последних ступенях размер приращения уменьшался вдвое. На каждой ступени нагружения на печать выводились значения деформаций  $\epsilon_i$  и напряжений  $\sigma_i$  ( $i$  - номер датчика).

При выборе параметра  $S$  было рассмотрено несколько возможностей. В простейшем варианте в качестве  $S$  принималась величина деформации  $\epsilon_i$ :

$$S = \epsilon_i. \quad (2)$$

Полученное таким путем значение параметра  $F/S$  выводилось на печать наряду с деформациями и напряжениями, что позволяло строить в ходе эксперимента отдельные графики  $F/S(F)$ . По характеру получаемых кривых осуществлялся предварительный прогноз критических усилий. Для датчиков I и III групп рассматривались также варианты, основанные на формулах:

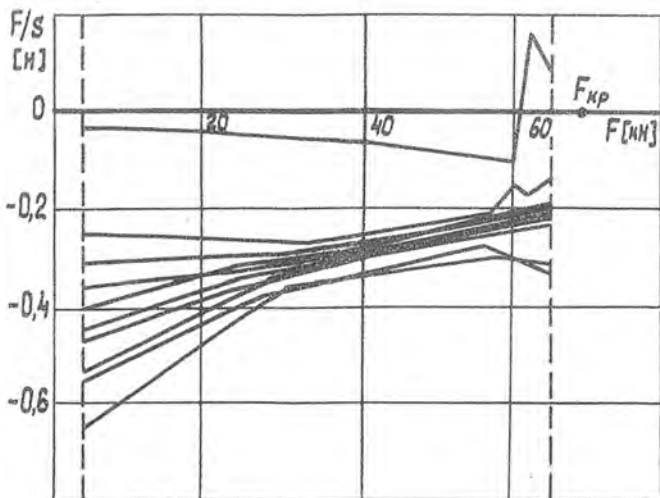


Рис. 3

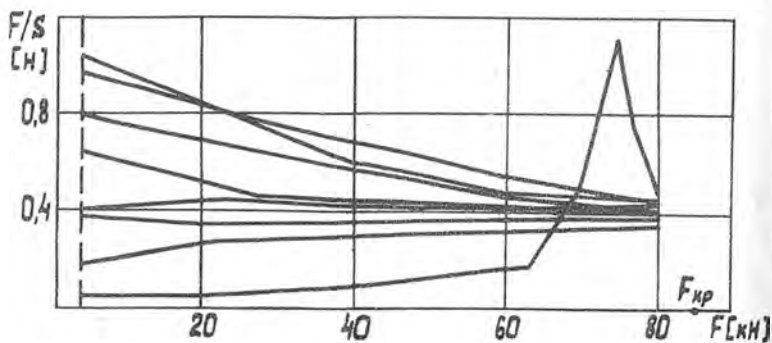


Рис. 4

$$S = 0,5 | \varepsilon^{(1)} + \varepsilon^{(2)} |, \quad (3)$$

$$S = K | \varepsilon^{(1)} - \varepsilon^{(2)} |, \quad (4)$$

где  $\varepsilon^{(1)}$ ,  $\varepsilon^{(2)}$  — показания датчиков одной пары, наклеенных на внутренней и внешней поверхностях оболочки соответственно;  $K$  — масштабный коэффициент.

Обработка результатов эксперимента осуществлялась с помощью ЭВМ БЭСМ-6. Для каждого образца массивы числовых значений деформаций на всех ступенях нагружения и массив усилий вводились в ЭВМ с перфокарт. С помощью специальной программы по формулам (2)–(4) подсчитывался параметр  $S$ . Затем графопостроителем "АТЛАС-3" совместно с ЭВМ БЭСМ-6 строились графики функций  $F/S(F)$ . Общий вид графиков, построенных для одного из образцов для случаев, когда  $S$  подсчитывалось по формулам (2), (3) или (4), представлен соответственно на рис. 3, 4, 5.

Отметим сразу, что представленные на рис. 5 кривые имеют сложный характер, затрудняющий их обработку. В связи с этим в дальнейшем будем рассматривать лишь критерии (2), (3). Предварительный анализ графиков (рис. 3, 4) показал, что среди них могут быть выделены четыре характерные группы. На рис. 6 представлены типичные для каждой группы кривые.

Группа графиков I относится к датчикам, попавшим в зоны выпучивания. Для них характерно убывание абсолютной величины  $F/S$  с ростом  $F$ , что типично для продольного изгиба [1]. Именно эти графики служат основой для прогноза критических усилий. К группе 2 отнесены кривые, приблизительно параллельные оси  $F$  и свидетельствующие о линейном деформировании в местах наклейки соответствующих датчиков. В некоторых случаях получались кривые типа 3. Поведение этих кривых, по-видимому, говорит о сложном взаимодействии форм выпучивания в процессе возрастания нагрузки. Наконец, кривые типа 4 сигнализируют о мелких локальных хлопках, которые могут происходить задолго до исчерпания несущей способности оболочки.

Обработка полученных графиков проводилась следующим образом. Отбрасывались все кривые за исключением кривых группы I. Предварительный прогноз, о котором говорилось выше, осуществлялся на первых ступенях нагружения путем экстраполяции начальных участков кривых до пересечения их с осью  $F$ . При этом отбрасывались получаемые значения критических усилий, если они в 3 раза и более превышали величину  $F_{кр}^p$ ; остальные величины осреднялись. Прово-

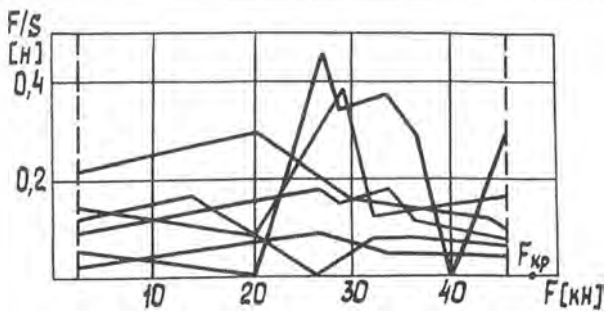


Рис. 5

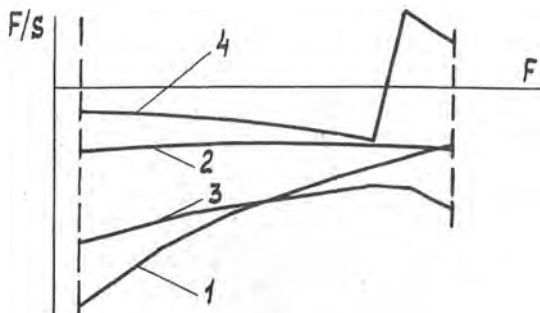


Рис. 6

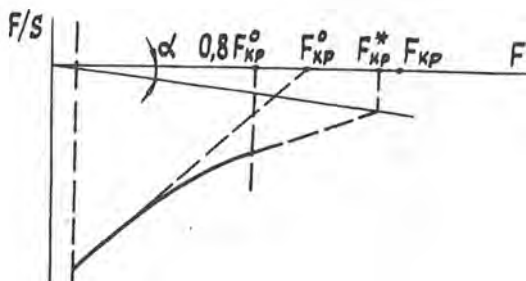


Рис. 7

анный таким образом прогноз  $F_{кр}^o$  оказывался, как правило, меньше действительного значения критической силы  $F_{кр}$ , то есть он служит нижней оценкой  $F_{кр}$ . Полученные значения  $F_{кр}$  приведены в графе 6 таблицы I. О возможности прогнозирования  $F_{кр}$  на начальных ступенях нагружения сообщалось ранее в работе [6].

Далее выбиралась предельная прямая. Наилучшие результаты получались, если в качестве  $\epsilon_{пр}$  выбиралась величина, равная 0,2%. При достижении нагрузкой значения  $0,5 F_{кр}^o$  производилось уточнение прогноза на каждой ступени нагружения путем экстраполяции кривых  $F/S(F)$  до пересечения с предельной прямой и осреднением полученных результатов. При этом не принимались во внимание результаты, составляющие менее  $0,5 F_{кр}^o$  либо более  $3 F_{кр}^o$ . Окончательный прогноз  $F_{кр}^*$  осуществлялся при достижении нагрузкой значения  $F \approx 0,8 F_{кр}^o$  (см. рис. 7); полученные величины  $F_{кр}^*$  приведены в графе 7 таблицы I. Прогноз проверялся разрушением образцов. Экспериментальная критическая нагрузка  $F_{кр}$  (графа 8) сопоставлялась с прогнозируемой. Погрешность прогноза в процентах показана в графе 9.

В графе 5 таблицы I приведена теоретическая оценка критического усилия  $F_{кр}^p$ , а в графе 10 - значения  $\epsilon_{пр}$ , которые давали бы точный прогноз, т.е. при которых  $F_{кр} = F_{кр}^*$ . Осредненное по всем образцам значение  $\epsilon_{пр}$  оказалось равным 0,205%, что подтверждает правильность выбора  $\epsilon_{пр}$  в ходе эксперимента.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что описанная в работе методика пригодна для проведения неразрушающих испытаний цилиндрических оболочек при осевом сжатии.

### Л и т е р а т у р а

1. Robert E. Jones and Bwa E. Greene „The force/stiffness Technique for Nondestructive Buckling Testing” AJAA Paper, N351, 1974, p. 1-8.
2. Саусвелл Р.В. Введение в теорию упругости. - М.: Госиздат, издательство иностранной литературы, 1948, - 674 с.
3. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. - ОГИЗ, Госиздат, 1946. - 531 с.
4. Алдутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. - М.: Машиностроение, 1973. - 310 с.
5. Валзбух Л.И. и др. Основы строительной механики ракет. - М.: Высшая школа, 1969. - 494 с.
6. Horton W.H., Nassar E.M., Singhal M.K. Determination of the critical loads of shells by nondestructive methods. „Exper. Mech.”, 1977, 17, N4, p. 154-155.