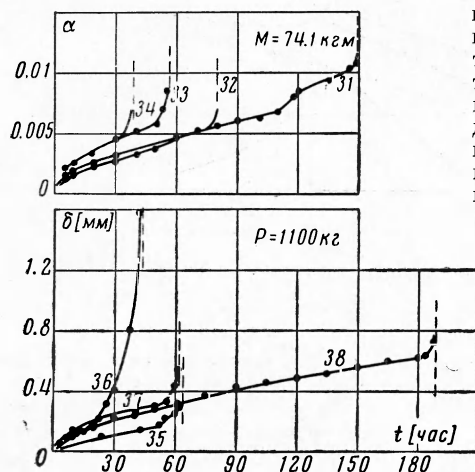


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

А. П. Кузнецов, Н. М. Юнгерман
(Новосибирск)

Приводятся результаты экспериментальных исследований устойчивости дюралевых тонкостенных цилиндрических оболочек в условиях ползучести при сжатии и чистом изгибе.

Испытания на устойчивость при изгибе и испытания одной партии образцов при сжатии проводились на специальных установках рычажного типа, позволяющих нагружать нагретые образцы различными видами постоянной нагрузки: осевой силой, изгибающим и крутящим моментами и т. д. Постоянная нагрузка на этих установках поддерживалась подвешенным грузом. Испытания другой партии образцов при сжатии проводились на гидравлической испытательной машине ЦДМ-30 с односекционной печью. Постоянная нагрузка здесь поддерживалась автоматическим регулятором, включенным в гидравлическую систему машины. Точность поддержания нагрузки во всех случаях $\pm 2\%$.



Фиг. 1

потенциометром ЭПД-12, а контроль за температурным полем осуществлялся при помощи самописца температур ЭПП-09. Датчиками для этих приборов служили хромель-алюмелевые термопары.

В качестве образцов для испытаний использовались оболочки, выточенные из пресованных дюралевых труб марки Д16Т. Номинальные размеры оболочек следующие: внутренний диаметр $d = 175$ мм, толщина стенки $\delta = 0.5$ мм, длина $l = 425$ мм (длина рабочей части около 360 мм), ширина торцевых обводов 12 мм. Таким образом, исследуемые образцы относились к категории длинных тонких оболочек.

Все изготовленные образцы подвергались контрольным измерениям, при которых в трех поперечных сечениях измерялись величины взаимно перпендикулярных диаметров d_1 и d_2 и толщина стенки образца. Результаты измерений показали, что отклонения от номинальной величины по толщине стенки в рабочей части образца не превышают $+0.02$ мм, а относительная овальность $(d_1 - d_2) / d_1$ была равна 1—2%. Из проведенных дополнительно тщательных измерений характера начальных непрямолинейностей следует, что непрямолинейности оболочек не имеют определенной геометрической формы, не обладают осевой симметрией и могут быть представлены по образующей в виде длинных полуволн (длина их равна длине оболочки) с наложенными на них двумя-тремя более короткими полуволнами различной длины с амплитудой от 0.1 до 0.6 мм и от 0.05 до 0.15 мм соответственно. Так как каждый образец имеет свою геометрию начальных непрямолинейностей, сравнение образцов друг с другом по одному какому-либо параметру не представляется возможным. Приведенное описание начальных непрямолинейностей позволяет лишь оценить качество изготовления испытываемых образцов.

Испытания образцов проводились при 255°C . Образец нагревался до заданной температуры примерно 1—2 час, а затем выдерживался при этой температуре около получаса, после чего к нему плавно прикладывалась нагрузка, которая затем оставалась постоянной в течение всего времени эксперимента. Продолжались испытания до момента фактического разрушения образца, которое происходило мгновенно, «хлопком». Наблюдения за поверхностью испытываемых оболочек через небольшие окна в печах показали, что большую часть времени от момента приложения нагрузки до момента разрушения на поверхности оболочки нет заметных деформаций. Лишь неза-

Нагрев испытываемых образцов на рычажных установках осуществлялся электрическими печами, имеющими пять отдельных секций нагрева. Независимая регулировка напряжения на каждой секции позволяла создать достаточно равномерное поле температур на образце. Так, при испытаниях на изгиб разброс температуры в рабочей части образца не превышал $\pm 2^\circ\text{C}$, а при испытаниях на сжатие $\pm 5^\circ\text{C}$. В процессе испытаний постоянная температура образца поддерживалась с точностью до $\pm 2^\circ\text{C}$ электронным

долго до разрушения на поверхности оболочки появляется небольшая вмятина, развитие которой приводит затем к мгновенной потере несущей способности, «хлопку». В случае изгиба место появления вмятины предопределено наибольшим значением сжимающего напряжения, в случае осевого сжатия место ее появления произвольно.

В процессе испытаний на осевое сжатие через определенные промежутки времени производился замер продольной деформации индикаторами часового типа с ценой деления 0.01 мм. При испытаниях на изгиб такими же индикаторами в процессе испытаний измерялся поворот торцевого сечения, перемещение торцевого сечения оболочки

Таблица 1

№	P, кг	δ, мм	σ , кг/мм ²	t*, час
Первая партия				
1	3.640	0.50	13.23	0
2	3.900	0.50	14.17	0
3	2.870	0.48	10.83	0
4	2.850	0.50	10.36	0
5	3.000	0.50	10.90	1.33
6	3.000	0.50	10.90	0.05
7	2.500	0.50	9.08	0.16
8	2.500	0.52	8.73	1.5
9	2.500	0.52	8.73	5.0
10	2.000	0.52	6.97	7.42
11	2.000	0.49	7.41	5.16
12	2.000	0.49	7.41	8.33
13	1.500	0.49	5.55	58.11
14	1.500	0.50	5.45	54.9
15	1.500	0.50	5.45	17.33
Вторая партия				
16*	~2.700	0.51	9.62	0
17	~2.500	0.49	9.26	0
18	3.000	0.51	10.67	0.03
19	3.000	0.50	10.90	0
20	3.000	0.51	10.67	0.02
21	2.500	0.52	8.73	0.53
22*	2.500	0.49	9.25	0
23	2.500	0.51	8.90	0.11
24	2.500	0.51	8.90	0.55
25	2.500	0.51	8.90	0.25
26	2.500	0.50	9.08	0.54
27	2.000	0.51	7.16	7.58
28	2.000	0.50	7.27	18.33
29	2.000	0.49	7.41	2.75 (2.33)
30	2.000	0.50	7.27	3.00
31	2.000	0.50	7.27	9.83
32	1.500	0.50	5.45	53.75 (27)
33	1.500	0.50	5.45	34.5
34	1.500	0.51	5.32	71.0 (53) (60.5)
35	1.100	0.51	3.91	65.0
36	1.100	0.51	3.91	43.0
37	1.100	0.50	3.99	62.0 (56)
38	1.100	0.50	3.99	192.28

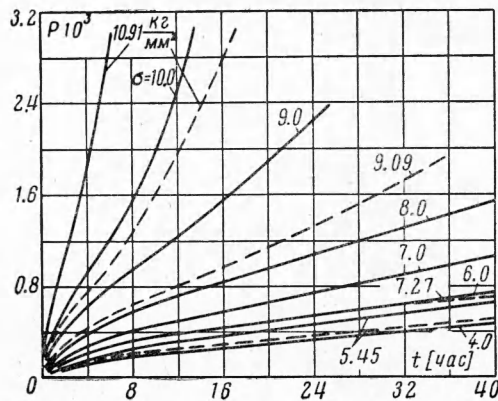
Таблица 2

№	M, кгм	δ, мм	σ_{max} , кг/мм ²	t*, час
1	96.4	0.51	7.67	0
2	129.2	0.50	10.48	0
3	135	0.50	10.92	0
4	130.7	0.50	10.60	0
5	90.0	0.51	7.15	0
6	94.0	0.49	7.78	0.5
7	94.0	0.51	7.47	0.03
8	94.0	0.51	7.47	0.07
9	94.0	0.50	7.63	34,91 (15.5)
10	94.0	0.51	7.47	7.59
11	94.0	0.50	7.63	6.17
12	94.0	0.51	7.47	5.08
13	94.0	0.51	7.47	2.59
14	85.9	0.50	6.96	10.75
15	85.9	0.50	6.96	8.40
16	85.9	0.50	6.96	4.25 (3)
17	85.9	0.52	6.70	3.40
18	85.9	0.51	6.82	2.00
19	85.9	0.49	7.11	20.77
20	85.9	0.50	6.96	19.75
21	85.9	0.50	6.96	16.02
22	85.9	0.50	6.96	5.75
23	85.9	0.50	6.96	1.59
24	80.6	0.50	6.54	3.17
25	80.6	0.50	6.54	36.83
26	80.6	0.51	6.40	41.25 (34)
27	80.6	0.52	6.28	24.00
28	80.6	0.51	6.40	22.50 (16)
29	80.6	0.51	6.40	14.03
30	80.6	0.47	6.95	7.25
31	74.1	0.51	5.89	149.33 (118)
32	74.1	0.53	5.67	78.00
33	74.1	0.50	5.92	54.59
34	74.1	0.50	5.92	36.75

Примечание. В скобках указано время, после которого происходил перерыв.

Примечания: Звездочками отмечены образцы с большими начальными неправильностями. В тех случаях, когда при испытаниях были перерывы, в скобках указано время, после которого происходил перерыв.

в плоскости действия момента и сплющивание оболочки в средней части. Вероятно, все эти деформации были обусловлены не только ползучестью срединной поверхности, но и изгибом поверхности оболочек вследствие начальных неправильностей. На фиг. 1 приведены графики измеренных перемещений при нагрузке $P = 1100 \text{ кг}$ для случая продольного сжатия и при моменте $M = 74.1 \text{ кгм}$ для случая изгиба. По оси абсцисс на этой фигуре отложено время, а по оси ординат — перемещение торцевой плиты δ при продольном сжатии и угол поворота торцевой плиты α при изгибе. Момент ускорения перед «хлопком», по-видимому,



Фиг. 2

равшие устойчивость оболочки имели точно такой же внешний вид, как и оболочки после мгновенной потери устойчивости. При испытаниях на изгиб волны образующимся при осевом сжатии.

Для проведения количественных оценок были получены характеристики ползучести материала при постоянных напряжениях при 255°C . На каждом уровне напряжения на машинах ДСТ-5 и ЗСТ 3/3 было испытано при растяжении от 5 до 12 образцов, изготовленных из труб каждой партии. Рабочая длина образцов 100 мм , диаметр 8 мм . Осредненные кривые ползучести, полученные в результате обработки всех экспериментов, приведены на фиг. 2 (пунктиром — для первой партии, сплошными линиями — для второй). Согласно [1], у прессованных труб из Д16Т при 250°C модуль упругости равен 5900 кг/мм^2 , модуль сдвига — 2080 кг/мм^2 , а предел пропорциональности — примерно 12 кг/мм^2 .

Полагая для оболочек при 255°C модуль упругости $E = 5850 \text{ кг/мм}^2$, а коэффициент Пуассона $\mu = 0.42$, имеем по формулам [2] для оболочек, не имеющих начальных неправильностей, верхнее значение критического напряжения при сжатии

$$\sigma^* = \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} E \frac{h}{R} = 0.54E \frac{h}{R} = 21.4 \text{ кг/мм}^2$$

Для тех же оболочек с достаточно большими начальными неправильностями прием нижнее значение критического напряжения при сжатии в виде

$$\sigma^{**} \approx \frac{0.173}{\sqrt{1-\mu^2}} E \frac{h}{R} = 0.192E \frac{h}{R} = 6.2 \text{ кг/мм}^2$$

Из табл. 1 видно, что мгновенная потеря устойчивости оболочек при сжатии происходит выше нижней критической нагрузки, свидетельствуя о хорошем качестве изготовления оболочек. Потеря устойчивости в условиях ползучести происходит как при нагрузках выше нижней критической нагрузки, так и при нагрузках ниже нижней критической нагрузки. Большой разброс результатов обусловлен тем, что все оболочки имеют разные начальные неправильности и сами характеристики ползучести имеют значительный разброс.

Пользуясь кривыми ползучести фиг. 2 и данными табл. 1, оценим общую деформацию срединной поверхности, при которой происходит потеря устойчивости в условиях ползучести. На фиг. 3 по оси ординат отложено безразмерное напряжение $\sigma^\circ = \sigma / \sigma^*$, а по оси абсцисс — безразмерная общая деформация $\varepsilon^\circ = E\varepsilon / \sigma^*$, в которой мгновенная деформация считается упругой, а деформация ползучести определяется по кривым ползучести фиг. 2. Как видно из фиг. 3, общая деформация, при которой происходит потеря устойчивости в условиях ползучести, меньше, чем упругая деформация, соответствующая верхнему критическому напряжению, но больше, чем упругая деформация, соответствующая нижнему критическому напряжению. Разброс

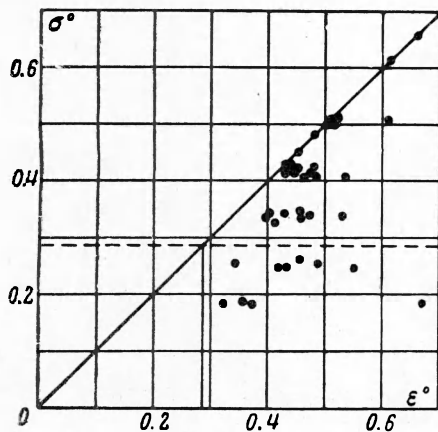
соответствует моменту появления первой вмятины. Изменение относительной овальности при испытаниях на изгиб было порядка $0.1-0.2\%$.

Всего было испытано: 38 оболочек — на осевое сжатие и 34 оболочки — на изгиб. Оболочки, испытанные на сжатие на машине ЦДМ-30, были изготовлены из одной партии материала (первая партия), а оболочки, испытанные на изгиб и на сжатие на рычажных установках, были изготовлены из другой партии материала (вторая партия). Все результаты испытаний оболочек помещены в табл. 1 и 2.

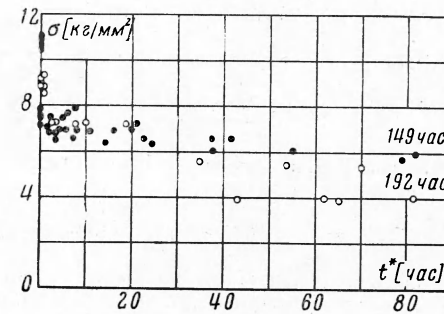
При испытаниях на сжатие потеря устойчивости происходила с образованием от шести до девяти полуволн — по окружности и двух-трех рядов полуволн — по длине. Потеря

экспериментальных данных увеличивается с уменьшением напряжений, т. е. с увеличением деформации ползучести. Точно такой же вывод о величинах критической деформации оболочки при сжатии в условиях ползучести получен теоретически в работе [3] на основе нелинейных уравнений оболочки, где для ползучести материала принята гипотеза старения.

Сравнение экспериментальных результатов по изгибу и осевому сжатию оболочек, изготовленных из второй партии материала, дано на фиг. 4. По оси абсцисс здесь отложено критическое время t^* , а по оси ординат — среднее напряжение при осевом сжатии или максимальное сжимающее напряжение в начальный момент в случае изгиба.



Фиг. 3



Фиг. 4

Из фиг. 4 следует, что в области низких уровней напряжения наименьшие значения критического времени получаются при продольном сжатии. Таким образом, оценка критического времени потери устойчивости оболочек в условиях ползучести, полученная по величине упругой деформации, соответствующей нижнему критическому напряжению сжатия σ^{**} , дает гарантированное нижнее значение критического времени и для сжатия и для изгиба.

Поступила 17 XI 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по авиационным материалам, т. II. Оборонгиз, 1958.
2. В о л ь м и р А. С. Устойчивость упругих систем. Физматгиз, 1963.
3. К у з н е ц о в А. П., К у р ш и н Л. М. К расчету на устойчивость оболочек в условиях ползучести по теории старения. Сб. «Проблемы устойчивости в строительной механике». Изд. литер. по строительству, М., 1965.

О ТЕЧЕНИИ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ТРУБАХ НЕКРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ

В. Б. Белозеров, В. А. Знаменский, А. Т. Листров

(Воронеж)

Движение вязко-пластической среды при постоянном перепаде давления в трубах круглого и кольцевого сечения рассмотрено в работах [1-4].

В настоящей работе методом малого параметра исследуется установившееся течение вязко-пластической среды в трубах некругового сечения.

1. Пусть в бесконечно длинной трубе эллиптического сечения

$$\frac{x^2}{b^2(1+\delta)^2} + \frac{y^2}{b^2(1-\delta)^2} = 1 \quad (\delta < 1)$$

где δ — безразмерный параметр; в направлении положительной оси z осуществляется течение вязко-пластического материала под действием постоянного градиента давления $q^2 = -dp/dz$.

Обозначим через μ коэффициент вязкости, k — предел текучести, S — площадь, а L — периметр поперечного сечения ядра.