

УДК:539.376

© 1992 г. А. М. ЛОКОЩЕНКО, С. А. ШЕСТЕРИКОВ

СПЛЮЩИВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ВНЕШНИМ РАВНОРАСПРЕДЕЛЕННЫМ ДАВЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

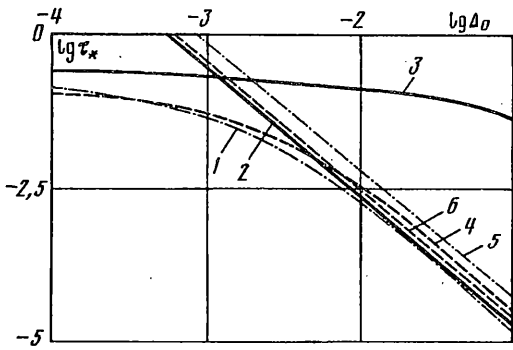
Цилиндрическая оболочка является конструктивным элементом, широко применяемым в машиностроении. В ряде отраслей промышленности широкое применение находят цилиндрические оболочки, нагруженные внешним распределенным давлением при высокой температуре (тепловыделяющие элементы реакторов, элементы аппаратов, используемых в химическом машиностроении, и т. д.). Если такая оболочка находится под действием внешнего давления длительное время с интенсивным развитием деформаций ползучести, то основная задача заключается в определении изменения напряжений и деформаций во времени, а также в вычислении времени работоспособности t_* такой оболочки до сплющивания.

Во всякой реальной оболочке срединная линия поперечного сечения в исходном состоянии в той или иной мере отличается от идеальной окружности. В большинстве работ при учете влияния начального несовершенства поперечного сечения на поведение оболочки обычно предполагают, что исходное поперечное имеет слегка овальную форму, характеризуемую двумя осями симметрии. В качестве количественной характеристики исходной овальности Δ_0 обычно используется отношение разности максимального и минимального диаметров поперечного сечения оболочки к их сумме. Коэффициент начальной овальности Δ_0 оказывает существенное влияние на значение времени работоспособности t_* оболочки.

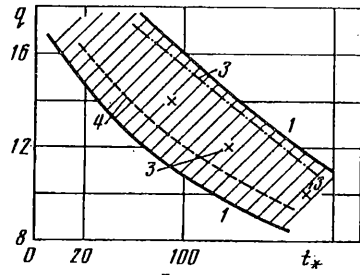
При аналитическом описании поведения цилиндрических оболочек под действием внешнего равномерно распределенного давления обычно используются различные геометрические гипотезы. Во многих работах ([1—4] и др.) форма кольца в полярных координатах аппроксимируется уравнением, в котором отклонение срединной линии поперечного сечения оболочки от окружности, зависящее от величины давления q и времени t , пропорционально косинусу двойного полярного угла. В цикле работ С. А. Шестерикова с сотрудниками ([5—9] и др.) развивается другой подход: форма некругового кольца в любой момент времени аппроксимируется сопряжением двух дуг окружностей.

1. Для сравнения результатов применения различных подходов рассмотрим длинную цилиндрическую оболочку толщины H и среднего радиуса R_0 , находящуюся в условиях нелинейной установившейся ползучести, при этом зависимость скорости установившейся ползучести dp/dt от напряжения σ аппроксимируется степенной функцией $dp/dt = B\sigma^n$, $n\gamma = 1$.

Введем в рассмотрение безразмерную толщину $\lambda = H/R_0$ и время $\tau = (2B/\lambda) [2(\gamma + 1)q/\lambda]^\gamma t$. В [9] отмечается, что рассматриваемая задача характеризуется двумя неизвестными малыми параметрами: Δ_0 и λ . Для случаев, когда один из них значительно меньше другого, возможны приближенные оценки τ_* . Так, при фиксированной толщине оболочки для относительно большой начальной овальности (при $\Delta_0/\lambda \gg 1$) и для очень малой начальной овальности



Фиг. 1



Фиг. 2

(характеризующейся условием $\Delta_0/\lambda \ll 1$) в [9] получены соответственно следующие предельные зависимости:

$$\tau_{*1} = \frac{(\sqrt{2} + 1)}{(n - 1)} \left[\frac{\lambda (n + 1)}{2n + 1} \right]^n \Delta_0^{(1-n)}, \quad \tau_{*2} = \frac{0,4\lambda}{n} \left[\frac{2(n + 1)}{n} \right]^n \ln \frac{1}{\Delta_0} \quad (1)$$

Из (1) следует, что если максимальное исходное радиальное отклонение срединной линии от идеальной окружности w_0 значительно меньше толщины оболочки, то зависимость критического времени $\tau_*(\Delta_0)$ от коэффициента начальной овальности имеет логарифмический характер, в противоположном случае зависимость $\tau_*(\Delta_0)$ имеет степенной характер.

Среди отмеченных выше работ в [3—5] учитывается степенной характер зависимости $\tau_*(\Delta_0)$, в [7—8] — логарифмический характер $\tau_*(\Delta_0)$, в [2, 6, 9] учитываются особенности деформирования оболочек в широком диапазоне Δ_0 . На фиг. 1 для случая $n = 3$, $\lambda = 0,01$ в логарифмических координатах приведены зависимости $\tau_*(\Delta_0)$, вытекающие из различных теоретических моделей. Кривая 1 соответствует расчетам [9] с использованием ЭВМ, кривые 2 и 3 получены на основании формул (1) для τ_{*1} и τ_{*2} , кривые 4—6 соответствуют результатам [2—4]. Очевидно, что кривая 1 при $\Delta_0/\lambda \ll 1$ приближается к кривой 3, а при $\Delta_0/\lambda \gg 1$ — к кривой 2. Зависимости $\tau_*(\Delta_0)$, имеющие степенной характер, изображаются на фиг. 1 прямыми линиями.

Проведение экспериментальных исследований деформирования цилиндрических оболочек в условиях ползучести вплоть до смятия сопряжено со значительными трудностями, поэтому количество таких исследований очень ограничено. Ниже приведен анализ трех известных серий испытаний оболочек, находящихся в условиях установившейся ползучести.

2. Первая экспериментальная серия. В Институте механики МГУ была проведена серия высокотемпературных испытаний цилиндрических оболочек под действием внешнего давления при ползучести, частично результаты этих испытаний описаны в [8]. Длина каждой оболочки равна 380 мм, материал — X18H10T, температура — 850° С. Внешний диаметр d , толщина H , давление q и экспериментальное время разрушения t_{*0} приведены в табл. 1. Для испытаний была изготовлена система автоматического регулирования температуры, налажена система создания вакуума (или аргонной среды) для предохранения вольфрамового нагревателя, подведены требуемое давление и вода для охлаждения кожуха установки. Регулирование температуры производилось при помощи одной термопары, прикрепленной к середине образца. Контроль за температурой осуществлялся с помощью трех термопар, расположенных в середине и на концах образца.

Вакуумирование чередовалось с введением аргона под избыточным давлением.

Таблица 1

d	H	q	t_{*0}	d_0	Δ_0	t_*	
						t_*^1	t_*^2
60	1,0	0,10	84	52	0,10	194	101
45	1,5	0,90	3,5	35	0,15	6,1	3,4
45	0,5	0,10	29	35	0,20	26	15
45	0,5	0,13	11,3	35	0,20	11	6,4
45	0,5	0,14	8	35	0,20	8,7	5,0
45	0,5	0,18	4	35	0,20	3,8	2,2
36	0,5	0,10	112	29	0,17	83	47
36	0,5	0,12	51	29	0,17	46	26
36	0,5	0,14	23	29	0,17	28	16
22	0,5	0,50	8	16	0,22	6,0	3,2

Таблица 2

k	R_0	H	w_0	$\lambda = H/R_0$	$\Delta_0 = w_0/R_0$	q	t_{*0}
1	29,03	2,00	0,015	0,06889	$5,17 \cdot 10^{-4}$	1,2	96,8
2	29,05	2,01	0,015	0,06919	$5,16 \cdot 10^{-4}$	1,2	148,0
3	29,02	1,99	0,010	0,06857	$3,44 \cdot 10^{-4}$	1,2	109,5
4	28,96	2,01	0,468	0,06941	$1,62 \cdot 10^{-2}$	0,95	27,2
5	29,01	2,01	0,390	0,06929	$1,34 \cdot 10^{-2}$	0,95	21,5
6	28,98	2,01	0,440	0,06936	$1,52 \cdot 10^{-2}$	0,85	40,3
7	28,96	2,00	0,445	0,6906	$1,54 \cdot 10^{-2}$	0,85	44,5
8	28,93	2,00	0,455	0,06913	$1,57 \cdot 10^{-2}$	0,75	93,2
9	29,03	1,99	0,463	0,06855	$1,60 \cdot 10^{-2}$	1,9	51,2
10	29,08	2,04	0,485	0,07015	$1,67 \cdot 10^{-2}$	1,7	131,0
11	29,09	1,99	0,458	0,06841	$1,57 \cdot 10^{-2}$	1,5	353,5

Таблица 3

k	t_{*0}	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
		[10]	[2]	[11]	[4]	[14]	[9]
1	96,8	98,0	60,8	40,7	$2 \cdot 10^5$	120,0	79,6
2	148,0	100,0	62,3	41,8	$2 \cdot 10^5$	125,0	81,6
3	109,5	104,0	65,0	42,8	$4 \cdot 10^5$	105,0	81,7
4	27,2	35,5	28,2	4,5	49,8	250,0	40,0
5	21,5	42,0	32,9	6,5	79,2	250,0	63,7
6	40,3	58,0	43,1	8,0	86,8	151,0	69,9
7	44,5	55,0	41,5	7,5	81,2	112,0	65,3
8	93,2	86,0	62,3	11,7	120,9	200,0	97,3
9	51,2	39,0	47,9	3,9	71,3	395,0	57,4
10	131,0	70,0	76,0	7,5	115,7	405,0	93,1
11	353,5	104,0	104,0	11,6	174,1	465,0	140,1
D		7,28	9,36	1417	5,43	4,16	4,15

Для охлаждения установки использовалась подача воды из магистрали. Оболочки испытывались под внешним давлением, которое подавалось от воздушного баллона при помощи редуктора и контролировалось образцовым манометром.

Все оболочки были снабжены индивидуальными вольфрамовыми нагревателями и установлены в общей камере. Нагреватель, встроенный внутрь оболочки, представлял собой спираль, он крепился на токопроводящем стержне из молибдена и удерживался в растянутом состоянии с помощью фиксаторов (плоских дисков из ниобия). Значение диаметров этих дисков, d_0 приведены в табл. 1. Когда вследствие сплющивания оболочек происходило касание оболочки и диска, то включалась звуковая сигнализация. За время t_0 принимается время деформирования оболочки до включения звуковой сигнализации.

Замеры исходной овальности сечения оболочек в холодном состоянии показали, что они имеют порядок 0,001. При учете мгновенного нагружения величина Δ_0 находится между 0,001 и 0,01. В качестве характеристик установившейся ползучести стали X18H10T при температуре 850° С были использованы полученные в Институте механики МГУ значения $n = 3,28$; $B = 4,37 \cdot 10^{-8} \text{ (МПа)}^{-3,28} \text{ час}^{-1}$.

Проведем учет влияния дисков, расположенных внутри оболочек, на время t_* . Эти диски ограничивают овальность оболочек предельной величиной Δ_* , приведенной в табл. 1. Время t_* достижения параметром Δ величины Δ_* можно получить, обобщая решение [9] при $\Delta_0/\lambda \ll 1$:

$$t_* = \frac{\lambda^2}{5Bn} \left(\frac{\lambda}{q} \right)^n \ln \left(1 + \frac{\Delta_*}{\Delta_0} \right)$$

В табл. 1 приведены значения t_* [час] при значениях $\Delta_0 = 0,001$ и $0,01$ (последние два столбца). Из таблицы следует, что оба теоретических значения t_* для каждой оболочки различаются между собой незначительно (во всех случаях максимальное среди них время превосходит минимальное менее, чем в 2 раза), а экспериментальные значения либо находятся внутри этого диапазона, либо несколько превышают теоретические значения t_* (этим обеспечивается запас прочности). Эти испытания показывают, что геометрический метод аппроксимации срединной линии поперечного сечения оболочки в виде сопряжения двух дуг окружностей приводит к теоретическим результатам, хорошо согласующимся с приведенными экспериментальными данными.

3. Вторая экспериментальная серия. В [10] описаны результаты экспериментов над цилиндрическими оболочками под внешним равномерно распределенным давлением, проведенных К. Нагато и Н. Такикава. Эксперименты проводились на тонкостенных оболочках из сплава Хастеллой-Х при 800° С (3 оболочки) и 900° С (8 оболочек). В работе приведены химический состав материала, параметры всех 11 испытанных оболочек (средний радиус, толщина, параметр начальной овальности, давление, время t_0), характеристики мгновенных упругих свойств и постоянные степенного закона ползучести. В табл. 2 приведены основные результаты испытаний. Первые восемь оболочек испытывались при $T = 900^\circ \text{ С}$, последние три — $T = 800^\circ \text{ С}$. Все 11 испытанных оболочек имеют средний радиус $R_0 \cong 29$ мм, отклонения R_0 от среднего значения не превосходят 0,3%, длина оболочек — 400 мм. Среднее значение толщины оболочек почти не отличается от 2,00 мм. Параметры закона установившейся ползучести сплава принимают следующие значения: при $T = 900^\circ \text{ С}$, $n = 3,6$; $B = 8,5 \cdot 10^{-10} \text{ (МПа)}^{-3,6} \text{ час}^{-1}$, при $T = 800^\circ \text{ С}$, $n = 3,7$; $B = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ (МПа)}^{-3,7} \text{ час}^{-1}$. В [10] теоретический анализ результатов испытаний проводился с помощью трех подходов: предложенной авторами [10] так называемой модели С-Buckl, предложенного в [2] решения для двухслойной оболочки и приближенной модели Черна [11]. Под моделью С-Buckl авторы [10] понимают численное решение методом конечных разностей

системы двух дифференциальных уравнений равновесия относительно радиального и окружного перемещений.

В табл. 3 приведены результаты обработки экспериментальных данных [10] с помощью различных теоретических моделей. При $i = 1, 2, \dots, 6$ указаны значения критических времен t_c (час), вытекающие из различных соотношений. Значение $i = 1$ соответствует модели С-Buckl [10] $i = 2$ — работе [2], $i = 3$ — решению [11]. При $i = 4$ рассмотрены соотношения, вытекающие из работы [4]. Значение $i = 5$ соответствует результатам вычисления t_c с помощью ЭВМ [12].

В последнем столбце таблицы 3 ($i = 6$) приведены результаты вычисления критического времени на основе (1). В (1) приведены две аппроксимационные формулы для случая двух различных соотношений малых величин Δ_0 и λ , в таблице 3 при $i = 6$ указаны значения t_c , представляющие собой минимум из двух полученных теоретических значений $t_{c,1}$ и $t_{c,2}$.

Для вычисления t_c следует в качестве Δ_0 понимать овальность в начале процесса ползучести, т. е. овальность нагруженной оболочки. Расчеты показывают, что значения параметров овальности ненагруженной и нагруженной оболочек различаются между собой незначительно (всего на 5—15%). Поэтому для удобства сравнения результатов использования различных моделей в табл. 3 приведены критические времена, вычисленные при значениях Δ_0 для ненагруженных оболочек. Следует отметить невозможность сравнения теоретических значений t_c при $i = 5$ с теоретическими значениями, вытекающими из других моделей, из-за ряда опечаток в [12].

В качестве интегральной меры расхождения экспериментальных и теоретических значений t_c примем сумму

$$D = \sum_{k=1}^N \left[1 - \frac{(t_{c0})_k}{(t_c)_k} \right]^2$$

где $N = 11$ — количество испытанных оболочек. Значения D для различных теоретических моделей приведены в нижней строке табл. 3. Минимальное значение D соответствует значению $i = 6$. Таким образом, при использовании меры разброса D получаем, что наилучшее описание экспериментальных данных [10] достигается при использовании методов, изложенных в [9].

4. Третья экспериментальная серия. Испытания этой серии оболочек из материала Хастеллой-Х при температуре 700° С проводились Каупа, они опубликованы в отчете западногерманского ядерного центра в Карлсруэ в 1971 г. Краткая информация об этих испытаниях приведена в [12].

Материал оболочек подчиняется степенному закону установившейся ползучести со следующими константами: $n = 6,1$; $B = 1,79 \cdot 10^{-17}$ (МПа)^{-6,1} ч⁻¹. Средний радиус оболочек $R_0 = 3,3$ мм, толщина $H = 0,4$ мм, исходная овальность $\Delta_0 = 2,45 \cdot 10^{-3}$. На фиг. 2 приведены опытные данные и результаты их обработки с помощью различных моделей. Область разброса экспериментальных данных (с доверительным интервалом 95%) ограничена кривыми 1. Крестиками 2 обозначены теоретические значения, полученные методом [14], кривыми 3 — результаты расчетов по программе [12], кривыми 4 — результаты применения [9]. На фиг. 2 видно, что все три рассмотренные модели приводят к теоретическим кривым, лежащим внутри области разброса экспериментальных данных. Преимущество [9] перед [14] и [12] состоит, во-первых, в том, что уравнение в [9] приводит к более «безопасным» результатам, а во-вторых, оно позволяет получить результаты в простой аналитической форме, без проведения громоздких вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. М.—Л.: Гостехиздат, 1946. 532 с.
2. Hoff N. J., Jasman W. E., Nachbar W. A study of creep collapse of long circular cylindrical shell//J. Aerospace Sci. 1959. V. 26. № 10. P. 663—669.
3. Волчков Ю. М., Немировский Ю. В. Несимметричное выпучивание цилиндрических оболочек в условиях ползучести//Изв. АН СССР. МТТ. 1967. № 4. С. 136—138.
4. Бондаренко Ю. Д., Матаев Г. А., Матушкин В. Л. Сплюсчивание и разрушение цилиндрической оболочки в условиях ползучести//Изв. Сев.-Кавказ. научн. центра выс. школы Техн. н. 1981. № 1. С. 89—91.
5. Ванько В. И., Шестериков С. А. Сплюсчивание кольца в условиях ползучести//Изв. АН СССР. МТТ. 1966. № 5. С. 127—130.
6. Ванько В. И., Шестериков С. А. Нелинейно-вязкие цилиндрические оболочки под внешним давлением//Изв. АН СССР. МТТ. 1971. № 1. С. 110—114.
7. Локощенко А. М., Шестериков С. А. Методика расчета на сплюсчивание цилиндрических оболочек в условиях ползучести//Научные труды. Ин-т механики МГУ. М.: Изд-во МГУ, 1973. № 23. С. 10—14.
8. Кашелкин В. В., Локощенко А. М., Мякотин Е. А., Шестериков С. А. Сплюсчивание цилиндрических оболочек в условиях ползучести: теория и эксперимент//Изв. АН СССР. МТТ. 1974. № 1. С. 155—158.
9. Локощенко А. М., Шестериков С. А. Сплюсчивание цилиндрических оболочек при ползучести//Изв. АН СССР. МТТ. 1985. № 3. С. 113—118.
10. Nagato K., Takikawa N. Creep collapse of a cylindrical shell subjected to external pressure at high temperature//Trans. 5th Int. Conf. Struct. Mech. Reactor Technol. Berlin. 1979. V. L.: Amsterdam e. a.: 1979. L8. 1/1.—L8.1/9.
11. Chern J. M. A simplified approach to the prediction of creep buckling time in structures. Simplified methods in pressure vessel analysis (eds. R. S. Barsoum)//ASME/CSME Montreal Pressure Vessel and Piping Conference (25.06.—29.06.1978). New York: 1978. P. 99—127.
12. Куликов И. С., Тверковкин Б. Е. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов. Минск: Наука и техника, 1984. 104 с.
13. Lassmann K. A criticism on fuel rod structural analysis//Nuclear Technology. 1978. V. 40. № 3. P. 321—328.
14. Лихачев Ю. М., Пупко В. Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1975. 278 с.

Москва

Поступила в редакцию
8.VI.1992