

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛЬШИХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ДО РАЗРЫВА И ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

В. Г. Баженов, В. К. Ломунов, С. Л. Осетров, Е. В. Павленкова

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород
E-mail: bazhenov@mech.unn.ru

Развит экспериментально-расчетный метод построения истинных диаграмм деформирования при растяжении стальных трубчатых образцов вплоть до разрушения при больших деформациях. Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния геометрических параметров цилиндрических оболочек, начальных несовершенств геометрии и краевых эффектов на процесс локализации деформаций, местонахождение шейки и критические нагрузки.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, растяжение, экспериментально-расчетный подход, истинные диаграммы деформирования, краевые эффекты, устойчивость, локализация пластических деформаций, шейка.

Введение. При теоретическом исследовании процесса растяжения трубчатого образца до разрыва необходимо использовать истинную диаграмму деформирования материала. При больших деформациях получение таких диаграмм с помощью имеющихся инструментальных средств затруднено, поскольку в испытываемых образцах вследствие наличия нелинейных краевых эффектов и локализации деформаций (образования шейки) возникает неодносное неоднородное напряженно-деформированное состояние. Сложность измерения параметров напряженно-деформированного состояния в шейке с целью построения полной диаграммы деформирования и определения предельных характеристик обусловлена также тем, что местонахождение шейки в эксперименте заранее неизвестно, так как оно определяется неоднородностью свойств материала по длине образца. Условие достижения максимальной нагрузки как критерий момента появления шейки при растяжении стержней с различным профилем поперечного сечения ввел А. Консидер [1]. Критическую

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг., а также при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант № НШ-2843.2012.8), Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 11-08-00565-а, 12-08-31190-мол.а, 12-08-33106-мол.а.вед, 12-08-12044-офи.м) и Министерства образования и науки РФ (соглашения № 14.В37.21.1902, 14.В37.21.1495).

© Баженов В. Г., Ломунов В. К., Осетров С. Л., Павленкова Е. В., 2013

деформацию при растяжении можно определить из условия

$$\frac{d\sigma_*}{d\varepsilon} = 0,$$

или

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{1 + \varepsilon},$$

или

$$\frac{d\sigma}{de} = \sigma,$$

где σ , σ_* — истинные и условные осевые напряжения соответственно; e , ε — истинные и условные осевые деформации соответственно.

Заметим, что исследование локализации деформаций с использованием билинейной диаграммы деформирования приводит к неустойчивости вычислений и физически нереальным результатам расчета, так как при переходе из состояния упругости в состояние пластичности происходит скачкообразное изменение угла наклона касательной, который и определяет момент потери устойчивости, уровень критических напряжений и местонахождение шейки [2].

Для исследования процессов деформирования и свойств материалов при больших деформациях целесообразно использовать экспериментально-расчетный подход [3, 4], который предполагает проведение совместного физического и компьютерного моделирования.

В данной работе экспериментально-расчетный подход применяется для построения истинных диаграмм деформирования материала вплоть до разрушения при растяжении образцов в виде тонкостенной цилиндрической оболочки. На основе полученных результатов исследований проведен анализ влияния геометрических параметров и начальных несовершенств геометрии на устойчивость процесса упругопластического деформирования оболочек и образования шейки. Численное моделирование осуществлялось на основе методики [5], разработанной для решения осесимметричных задач динамики оболочек вращения.

1. Модель деформирования оболочки и численная схема решения осесимметричной задачи. Оболочка рассматривается в цилиндрической системе координат (r, z) . Кроме того, вводится система координат (s, ξ) , связанная с деформируемой срединной поверхностью. Общая и местная системы ортогональных координат связаны соотношением

$$ds = \psi_z dr - \psi_r dz,$$

где $\psi_r = -\partial z / \partial s$, $\psi_z = \partial r / \partial s$ — направляющие косинусы нормали; s — длина дуги вдоль образующей. Процесс нагружения разбивается на несколько этапов. На каждом этапе приращения перемещений и деформаций полагаются малыми. Текущие координаты, описывающие геометрию оболочки, представляются в виде

$$r = r^H + u_r, \quad z = z^H + u_z, \quad ds = \sqrt{(dr)^2 + (dz)^2},$$

где $r^H = r^H(s)$, $z^H = z^H(s)$ — начальные координаты, описывающие начальную форму оболочки; $u_r = u_r(s, t)$, $u_z = u_z(s, t)$ — перемещения; t — время. Изменение толщины оболочки во времени $h = h(s, t)$ определяется из условия несжимаемости материала. Согласно теории Тимошенко скорости перемещений задаются в виде

$$\dot{u}_s(s, \xi, t) = \dot{u}_s(s, t) + \xi \dot{\varphi}(s, t), \quad \dot{u}_\xi(s, \xi, t) = \dot{u}_\xi(s, t),$$

где $\dot{\varphi}(s, t)$ — угловая скорость поворота поперечного сечения, представляющая собой сумму скорости поворота нормали $\dot{\psi}(s, t)$ и скорости сдвига $\dot{\gamma}(s, t)$.

Скорости деформаций (симметричная часть градиента перемещения) вычисляются через скорости перемещений:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{ii} &= \dot{e}_{ii}^0 + \xi \dot{\chi}_{ii} \quad (i = 1, 2), & \dot{e}_{11}^0 &= \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial s} \psi_z - \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial s} \psi_r, \\ \dot{e}_{22}^0 &= \frac{\dot{u}_r}{r}, & \dot{h} &= -h(\dot{e}_{11}^0 + \dot{e}_{22}^0), \\ \dot{\chi}_{11} &= \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial s}, & \dot{\chi}_{22} &= \frac{\dot{\varphi}}{r} \psi_z, & \dot{\gamma}^0 &= \dot{\varphi} + \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial s} \psi_r + \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial s} \psi_z. \end{aligned}$$

В случае упругих деформаций напряжения вычисляются на основе закона Гука, в случае пластических деформаций — с использованием теории течения с изотропным упрочнением:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{ij}^p &= \lambda S_{ij}, & S_{ij} &= \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0, & \sigma_0 &= (\sigma_{11} + \sigma_{22})/3, \\ S_{ij} S_{ij} &= \frac{2}{3} \sigma_i, & \sigma_i &= \sigma_i(\varkappa), & \varkappa &= \sqrt{\frac{2}{3}} \int_0^t \sqrt{\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p} dt. \end{aligned}$$

Здесь σ_i — интенсивность истинных напряжений. Уравнение поверхности текучести, ограничивающей в пространстве девiatorов напряжений область упругих состояний, принимается в форме уравнения Мизеса.

Вариационные уравнения движения оболочки следуют из уравнения баланса виртуальных мощностей работы:

$$\begin{aligned} \int_0^L \left[(N_1 \psi_z + Q \psi_r) \frac{\delta \partial \dot{u}_r}{\partial s} + \left(\frac{N_2}{r} + \rho h \ddot{u}_r \right) \delta \dot{u}_r \right] r ds - (r P_r \delta \dot{u}_r) \Big|_{s=0, L} &= 0, \\ \int_0^L \left((Q \psi_z - N_1 \psi_r) \frac{\delta \partial \dot{u}_z}{\partial s} + \rho h \ddot{u}_z \delta \dot{u}_z \right) r ds - (r P_z \delta \dot{u}_z) \Big|_{s=0, L} &= 0, \\ \int_0^L \left[M_1 \frac{\delta \partial \dot{\varphi}}{\partial s} + \left(\frac{M_2}{r} \psi_z + Q + \frac{\rho h^3}{12} \ddot{\varphi} \right) \delta \dot{\varphi} \right] r ds - (r M \delta \dot{\varphi}) \Big|_{s=0, L} &= 0. \end{aligned}$$

Здесь L — длина оболочки; ρ — плотность материала; N_1, N_2, Q, M_1, M_2 — внутренние усилия и моменты; $P_r = P_r(t), P_z = P_z(t), M = M(t)$ — внешние силы и моменты, действующие на контуре оболочки $s = 0, L$.

Для численного решения задачи применяются вариационно-разностный метод и явная схема “крест” [5], оценки устойчивости которой приведены в работе [6].

2. Построение истинной диаграммы деформирования. Следует отметить, что испытываемые образцы могут иметь переменное сечение. Как известно, при монотонном растяжении процесс нагружения в области локализации пластических деформаций будет активным до момента разрушения. Построение диаграммы деформирования основано на коррекции зависимости интенсивность истинных напряжений σ_i — интенсивность логарифмических деформаций e_i . Проводится анализ отношения значений растягивающих сил $\beta = F_3/F_p$, полученных в эксперименте (F_3) и расчете (F_p) при одних и тех же удлинениях образца. Затем устанавливается функциональная зависимость между максимальным значением интенсивности деформаций в объеме образца e_i^* и соответствующим удлинением. Итерационная процедура корректировки диаграммы осуществляется по формуле

$\bar{\sigma}_i(e_i^*) = \beta \sigma_i(e_i^*)$ до тех пор, пока результаты экспериментов и расчетов не будут совпадать с заданной точностью. Исследования показывают, что для сходимости итерационной процедуры достаточно в качестве начального приближения использовать любую выпуклую диаграмму деформирования упрочняющегося материала. Скорость сходимости (число итераций) слабо зависит от начального приближения. Изложенный итерационный процесс аналогичен методу хорд, применяемому для нахождения корней нелинейного алгебраического уравнения [7]. Данный метод гарантирует монотонную сходимость итерационного процесса при условии, что зависимость осевой силы от перемещения торца будет выпуклой функцией.

Наиболее эффективный алгоритм заключается в корректировке диаграммы на каждом этапе нагружения по мере растяжения образца. Можно также осуществлять корректировку сразу всей диаграммы. При этом необходимо решать задачу многократно. Этот способ является более трудоемким, но позволяет использовать доступную программу решения прямой задачи без каких-либо модификаций.

Эксперимент проводился на испытательной машине УМЭ-10ТМ. Рабочая часть цилиндрического образца, изготовленного из стали марки 12Х18Н10Т, имела следующие размеры: внешний диаметр $d_0 = 3 \cdot 10^{-2}$ м, длина $L_0 = 9,2 \cdot 10^{-2}$ м, толщина $h_0 = 10^{-3}$ м. Отношение начального радиуса срединной линии оболочки к толщине составляло $r_0/h_0 = 14,5$. Образец подвергался жесткому нагружению вплоть до разрушения. Регистрировалась зависимость осевой силы от перемещения захватов $F \sim \Delta L$. В среднем сечении образца с помощью деформометра с тензометрическим преобразователем (погрешность измерения равна 0,01 мм) измерялся его диаметр.

На рис. 1 показана экспериментальная зависимость $F \sim \Delta L/L_0$ (кривая 1), на рис. 2 — соответствующие условная $\sigma_* \sim e^p$ (кривая 1) и истинная $\sigma \sim e^p$ (кривая 2) диаграммы

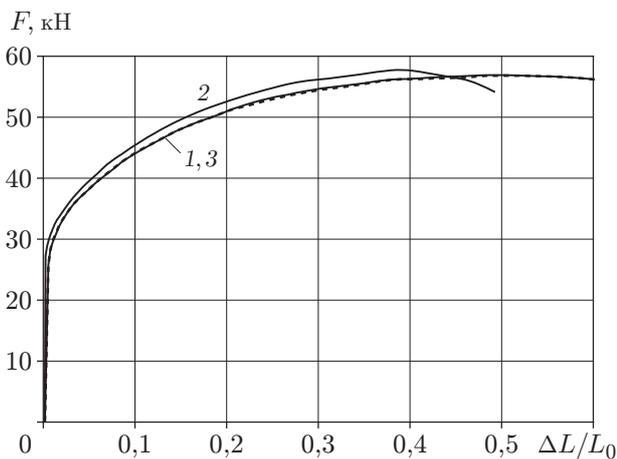


Рис. 1

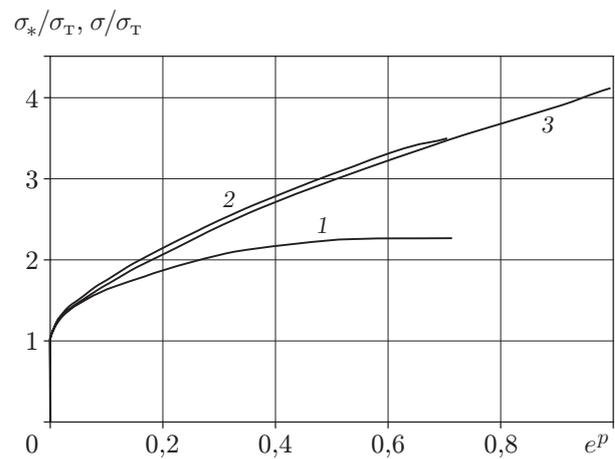


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость осевой силы F от относительного перемещения торца оболочки $\Delta L/L_0$:

1 — экспериментальные данные; 2 — результат численного расчета с использованием исходной диаграммы; 3 — результат численного расчета с использованием диаграммы, полученной в результате итерационной корректировки

Рис. 2. Диаграммы деформирования материала:

1 — условная диаграмма деформирования; 2 — истинная диаграмма деформирования, полученная на основе экспериментальных данных; 3 — истинная диаграмма деформирования, полученная в результате итерационной корректировки

деформирования материала, полученные с использованием формул

$$\sigma_* = \frac{F}{S_0}, \quad \sigma = \frac{F}{S} = \sigma_* \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right), \quad e = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right), \quad e^p = e - e^e,$$

где F — осевая сила; S_0, S — начальная и текущая площади поперечного сечения; L_0 — начальная длина оболочки; ΔL — перемещение торца оболочки. На рис. 2 значения функций на оси ординат отнесены к пределу текучести материала $\sigma_T = 270$ МПа.

При численном моделировании область, в которой закреплялись образцы, не рассматривалась. Образец представлялся в виде цилиндрической оболочки, один торец которой ($s = L$) жестко зашпечлен: $u_r = u_z = \varphi = 0$, а другой торец ($s = 0$) перемещается вдоль оси с постоянной скоростью $\dot{u}_z = v$, при этом $u_r = \varphi = 0$. Скорость нагружения $v = 1$ м/с. Использовались следующие характеристики материала: модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. В качестве истинной диаграммы деформирования принималась экспериментальная диаграмма (кривая 2 на рис. 2). На рис. 1 приведены зависимости осевой силы от относительного смещения торца, полученные в эксперименте (кривая 1) и при численном моделировании (кривая 2). Видно, что полученная в результате расчета максимальная осевая сила незначительно отличается от экспериментальной. Однако как моменты образования шейки, так и процессы ее развития различаются существенно. Полученная в результате итерационной корректировки истинная диаграмма для исследуемого образца приведена на рис. 2 (кривая 3), соответствующая осевая сила, полученная при численном моделировании, показана на рис. 1 (кривая 3).

В эксперименте разрыв образца произошел не в среднем сечении ($s = 0,5L$), а на расстоянии $s = 0,36L$ от подвижного торца. Сравнение диаметров и толщин образцов после разрыва показало, что в эксперименте внешний диаметр образца в области шейки $d_э = 22,4 \cdot 10^{-3}$ м, толщина $h_э = 0,72 \cdot 10^{-3}$ м, а в расчете $d_p = 21,84 \cdot 10^{-3}$ м, $h_p = 0,726 \cdot 10^{-3}$ м. На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные значения толщины образца в момент разрыва. По оси абсцисс отложено отношение расстояния s от центра шейки к длине оболочки L в недеформированном состоянии.

На рис. 4 приведены полученные при численном моделировании распределения относительного изменения толщины $\Delta h/h_0$ (сплошные линии) и радиуса $\Delta u_r/r_0$ (штриховые линии) оболочки при различных значениях $\Delta L/L_0$ (по оси абсцисс отложено отношение расстояния s от торца рабочей части к длине оболочки L в недеформированном состоянии).

Процесс растяжения образца можно разделить на две стадии. На первой стадии деформирования в средней части образца формируется безмоментная зона однородного изменения толщины и радиуса оболочки, а вблизи торцов — зона, в которой наблюдается краевой эффект, вызванный ограничением деформаций в области закрепления образца. В зоне равномерного деформирования значения относительного изменения толщины и радиуса приблизительно равны. Это свидетельствует о том, что на данном участке имеет место одноосное напряженное состояние. Из рис. 4 следует, что зоны равномерного изменения толщины и радиуса совпадают. В процессе растяжения область равномерных деформаций уменьшается за счет расширения зон, в которых наблюдается краевой эффект. Первая стадия процесса растяжения заканчивается в момент достижения осевой силой максимального значения ($\Delta L/L_0 \approx 0,5$). На второй стадии появляется и развивается шейка. Процесс деформирования локализуется в средней части образца и прекращается вблизи торцов. Изменение толщины и радиуса оболочки становится неравномерным по всей длине оболочки. Для исследуемого материала с истинной диаграммой деформирования, показанной кривой 3 на рис. 2, критическая истинная деформация принимает значение $e_{cr} = 47,4$ %.

Исследования, проведенные на основе нелинейных диаграмм деформирования упрочняющегося материала, показали, что учет головок в области закрепления образца не оказывает влияния на момент и область образования шейки цилиндрической оболочки.

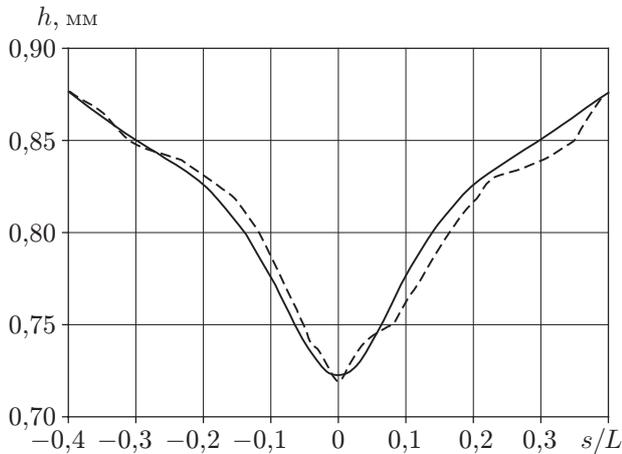


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость толщины оболочки от отношения s/L в момент ее разрушения: штриховая линия — экспериментальные данные; сплошная линия — результаты численного расчета

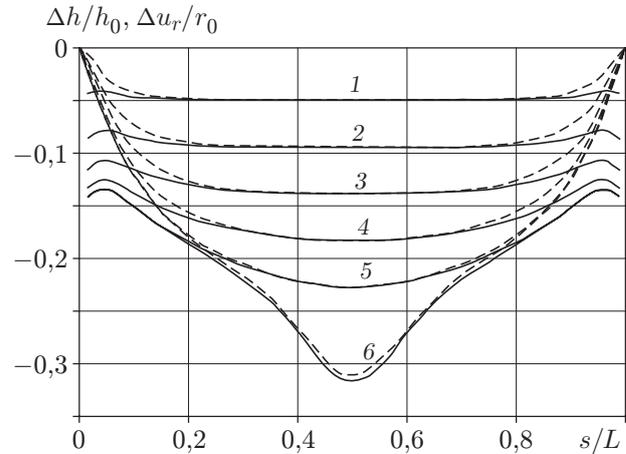


Рис. 4

Рис. 4. Относительные изменения толщины (сплошные линии) и радиуса (штриховые линии) вдоль оболочки при различных значениях $\Delta L/L_0$:

1 — $\Delta L/L_0 = 0,1$; 2 — $\Delta L/L_0 = 0,2$; 3 — $\Delta L/L_0 = 0,3$; 4 — $\Delta L/L_0 = 0,4$; 5 — $\Delta L/L_0 = 0,5$; 6 — $\Delta L/L_0 = 0,6$

Этот вывод подтверждается данными эксперимента. При решении задачи в безмоментной постановке погрешность определения прогибов не превышает 1 %, т. е. при исследовании задач о закритическом поведении оболочек моментные составляющие не оказывают существенного влияния.

3. Исследование процесса образования шейки. На основе полученной истинной диаграммы деформирования для стали марки 12X18H10T проведен анализ влияния начальной длины, толщины и начальных несовершенств толщины на устойчивость и локализацию процесса деформирования оболочки.

Для изучения влияния начальной длины при численном моделировании рассматривались оболочки длиной $L_0 = 7d_0, 5d_0, 3d_0, 2d_0$ (d_0 — начальный диаметр оболочки).

На рис. 5 показаны распределения вдоль оболочки относительного изменения ее радиуса $\Delta u_r/r_0$ при $\Delta L/L_0 = 0,5; 0,6$.

На рис. 6 показаны зависимости интенсивности истинных деформаций на плоскости симметрии оболочки e_i от относительного удлинения оболочки $\Delta L/L_0$. Штриховая линия соответствует значению e_i , при котором происходит потеря устойчивости пластического деформирования материала и начинается локализация деформаций в виде шейки [1]. Штрихпунктирная линия — кривая $e_i = \ln(1 + \Delta L/L_0)$, соответствующая равномерному растяжению без учета влияния краевых эффектов.

Размер зоны, в которой наблюдается краевой эффект, не зависит от начальной длины образца и увеличивается только при растяжении оболочки. Расстояние от торца, на котором имеет место краевой эффект, составляет $s = 3d_0$ при $\Delta L/L_0 = 0,5$. Следовательно, в образце с начальной длиной $2d_0$ зоны, в которых наблюдаются краевые эффекты, смыкаются до достижения момента потери устойчивости, а в образце с начальной длиной $3d_0$ — в момент, предшествующий потере устойчивости.

Размер зоны локализации деформаций в шейке существенно зависит от начальной длины образца. В случае образования шейки на участке равномерной деформации

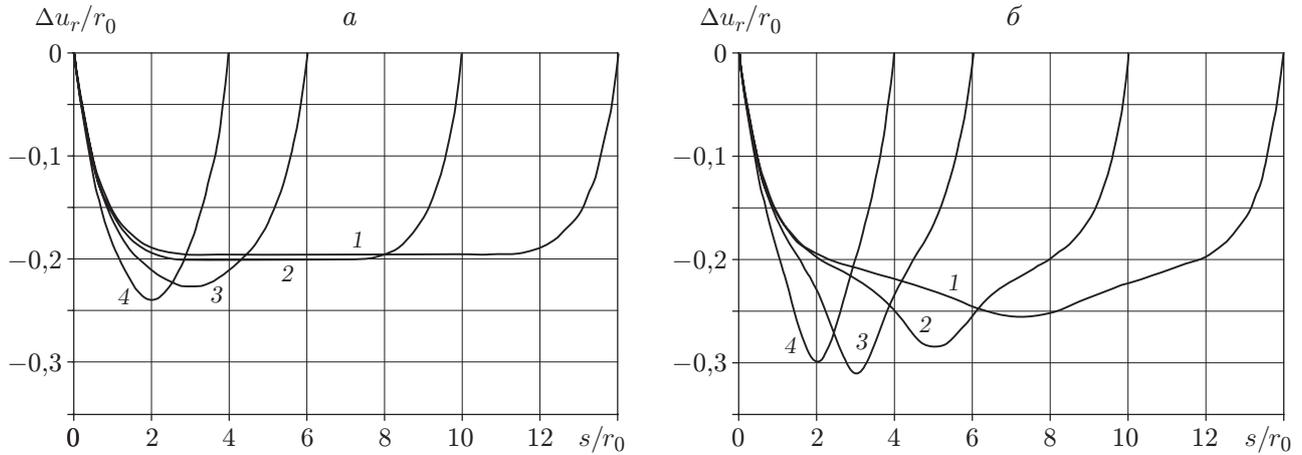


Рис. 5. Относительное изменение радиуса вдоль оболочки при различных значениях $\Delta L/L_0$:

$a - \Delta L/L_0 = 0,5$, $b - \Delta L/L_0 = 0,6$; 1 — $L_0 = 7d_0$, 2 — $L_0 = 5d_0$, 3 — $L_0 = 3d_0$, 4 — $L_0 = 2d_0$

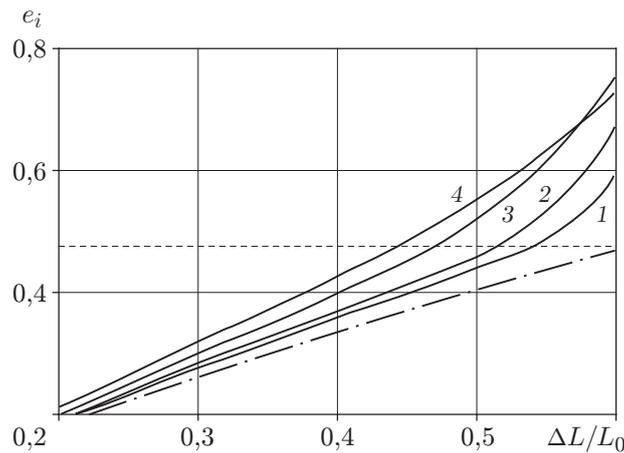


Рис. 6. Изменение интенсивности истинных деформаций в середине оболочки от относительного перемещения торца:

1 — $L_0 = 7d_0$, 2 — $L_0 = 5d_0$, 3 — $L_0 = 3d_0$, 4 — $L_0 = 2d_0$; штрихпунктирная линия — зависимость $e_i = \ln(1 + \Delta L/L_0)$, штриховая — значение $e_i = 0,474$

($L_0 = 7d_0, 5d_0$) увеличение деформаций начинается в середине образца и распространяется по всей зоне равномерной деформации, процесс деформирования в зоне, где наблюдаются краевые эффекты, прекращается, при этом скорость роста деформаций в области образования шейки не зависит от начальной длины образцов. В случае отсутствия участка равномерной деформации ($L_0 = 2d_0, 3d_0$) увеличение деформаций начинается в середине образца, при этом скорость их роста в области шейки меньше, чем в первом случае, и с уменьшением начальной длины уменьшается.

При одном и том же относительном удлинении различие зависимостей $F \sim \Delta L/L_0$ для образцов различной длины составляет менее 2 %. С уменьшением начальной длины образцов максимальная осевая сила увеличивается. В окрестности максимума осевой силы имеется горизонтальный участок, в начале которого появляется шейка.

Вследствие влияния краевых эффектов относительное удлинение, при котором начинается локализация деформаций, существенно зависит от начальной длины образца.

В случае отсутствия краевых эффектов потеря устойчивости начинается при относительном удлинении $\Delta L/L_0 = 60\%$, в случае $L_0 = 7d_0$ локализация деформаций начинается при $\Delta L/L_0 = 55\%$, в случае $L_0 = 5d_0$ — при $\Delta L/L_0 = 52\%$, в случае $L_0 = 3d_0$ — при $\Delta L/L_0 = 47\%$, в случае $L_0 = 2d_0$ — при $\Delta L/L_0 = 44\%$. В образцах различной длины область образования шейки находится в плоскости их симметрии. Процесс локализации деформации начинается в момент достижения интенсивностью истинных напряжений критического значения (по А. Консидеру). При этом интенсивности истинных деформаций, при которых начинается локализация деформаций, для разных длин образцов практически совпадают и удовлетворяют условию А. Консидера для исследуемого материала, т. е. равны $47,4\%$. Следовательно, область распространения краевых эффектов и величины окружных и радиальных напряжений в этой области малы, поэтому применение критерия потери устойчивости А. Консидера для определения момента начала локализации деформаций при одноосном растяжении образцов является обоснованным.

Для изучения влияния начальной толщины при численном моделировании рассматривались оболочки с $r_0/h_0 = 58,00; 29,00; 14,50; 7,25$ (r_0 — начальный радиус срединной линии оболочки; h_0 — начальная толщина оболочки). Начальные диаметр и длина оболочек определены в п. 2. Изменение толщины в указанных пределах не оказывает влияния на краевые эффекты, устойчивость и локализацию процесса деформирования оболочки.

Для изучения влияния начальных несовершенств геометрии при численном моделировании рассматривались оболочки с заданным первоначальным несовершенством толщины:

$$\Delta h = (\delta/2)(1 - \cos(2\pi\bar{s}/\bar{l}))$$

(δ — амплитуда отклонения; \bar{s}, \bar{l} — координата и длина участка начального несовершенства геометрии). В расчетах использовались следующие значения относительных величин: $\delta/h_0 = 0 \div 0,05$; $\bar{l}/h_0 = 2; 16; 40$; $\bar{s}/L_0 = 1/4, 1/3, 1/2$.

На рис. 7,а приведены распределения вдоль оболочки относительного изменения ее радиуса при $\Delta L/L_0 = 0,6$. На рис. 7,б показана зависимость осевой силы $F/(S_0\sigma_T)$ (S_0 — начальная площадь сечения оболочки) от относительного удлинения оболочки $\Delta L/L_0$.

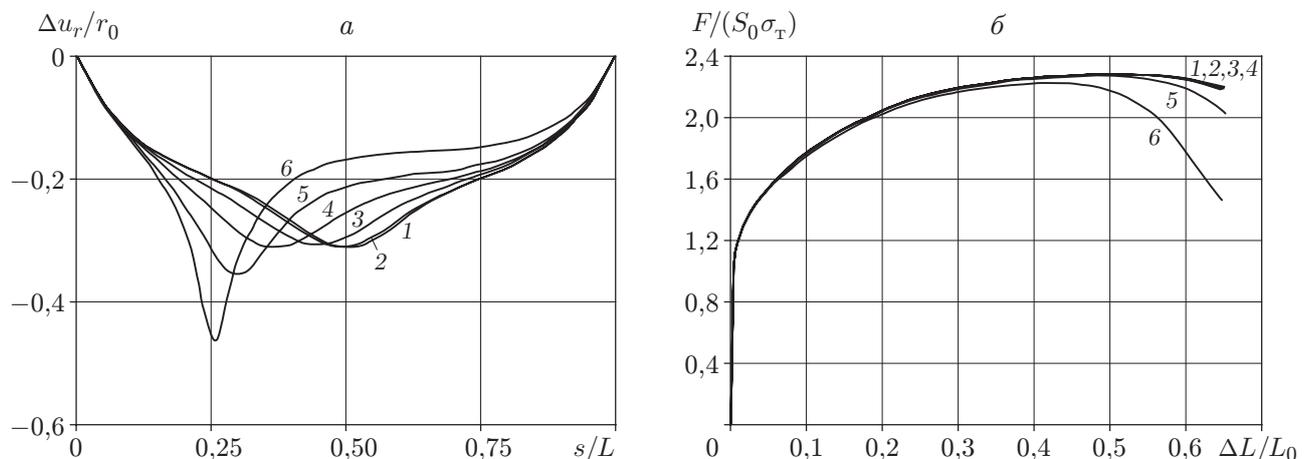


Рис. 7. Зависимости радиального перемещения от отношения s/L ($\Delta L/L_0 = 0,6$) (а) и осевой силы от относительного перемещения торца оболочки (б) при $\bar{s}/L_0 = 1/4$, $\bar{l}/h_0 = 40$ и различных значениях δ/h_0 :
 1 — $\delta/h_0 = 0$; 2 — $\delta/h_0 = 0,001$; 3 — $\delta/h_0 = 0,005$; 4 — $\delta/h_0 = 0,01$; 5 — $\delta/h_0 = 0,02$; 6 — $\delta/h_0 = 0,05$

Длина участка начального несовершенства геометрии незначительно влияет на критические нагрузки и процесс локализации деформирования оболочек. При амплитудах отклонения $\delta > 0,01h_0$ шейка образуется на участке начального несовершенства геометрии, при меньших амплитудах наблюдается миграция шейки по направлению к плоскости симметрии оболочки, и при $\delta < 0,001h_0$ шейка находится в плоскости симметрии. В эксперименте шейка редко образуется в середине образца вследствие неоднородности материала по его длине. При уменьшении толщины образца на величину, превышающую $0,02h_0$, шейка образуется при меньшем удлинении образца. Например, при $\delta = 0,05h_0$ удлинение, при котором образуется шейка, на 10 % меньше, чем в случае отсутствия несовершенств геометрии.

Заключение. Использованный в работе экспериментально-теоретический метод исследования процессов деформирования является эффективным методом изучения прочностных характеристик материалов при достаточно сложной геометрии образцов, больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии. Этот метод позволяет повысить достоверность оценки состояния и параметров материала в элементах конструкций, находящихся в условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.
2. Бережной Д. В., Паймушин В. Н. О двух постановках упругопластических задач и теоретическое определение места образования шейки в образцах при растяжении // Прикл. математика и механика. 2011. Т. 75, вып. 4. С. 635–659.
3. Баженов В. Г., Зефирова С. В., Осетров С. Л. Экспериментально-расчетный метод идентификации деформационных и прочностных свойств материалов // Завод. лаб. Диагностика материалов. 2006. Т. 72, № 9. С. 39–45.
4. Пат. 2324162 РФ, МПК G 01 N 3/00 (2006.01). Способ определения деформационных и прочностных свойств материалов при больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии / В. Г. Баженов, С. В. Зефирова, Л. Н. Крамарев, С. Л. Осетров, Е. В. Павленкова. Опубл. 10.05.08, Бюл. № 13.
5. Баженов В. Г., Ломунов В. К. Исследование упругопластического выпучивания оболочек вращения при ударном нагружении // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. Горький: Горьк. ун-т, 1975. Вып. 2. С. 44–50.
6. Баженов В. Г. Вариационно-разностные схемы в нестационарных волновых задачах динамики пластин и оболочек / В. Г. Баженов, Д. Т. Чекмарев. Н. Новгород: Нижегород. ун-т, 1992.
7. Демидович Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. М.: Наука, 1966.

Поступила в редакцию 6/III 2012 г.