

УДК 539.3:534.1

МЕХАНИКА

Академик АН УССР В. И. МОССАГОВСКИЙ, Л. И. МАНЕВИЧ, Е. Ф. ПРОКОПАЛО
**О ЗАКРИТИЧЕСКИХ ФОРМАХ РАВНОВЕСИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК, НАГРУЖЕННЫХ ВНЕШНИМ ДАВЛЕНИЕМ**

Экспериментальное исследование устойчивости продольно сжатых оболочек при действии локальных ударных возмущений, описанное в работе ⁽¹⁾, позволило выявить ряд новых закономерностей их закритического поведения. В случае внешнего давления цилиндрическая оболочка оказывается менее чувствительной к внутренним возмущениям (начальная погибь и др.), что подтверждается теоретическим анализом начальной стадии закритической деформации ⁽²⁾. Влияние малых, но конечных внешних возмущений, которые могут действовать в процессе эксплуатации на нагруженную внешним давлением оболочку, совершенно не изучено. В связи с этим было проведено экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек, нагруженных равномерным давлением, при локальных динамических возмущениях.

В процессе исследования выявляли закритические формы равновесия, реализуемые при локальном поперечном ударе, определяли соответствующие нижние критические нагрузки и изучали чувствительность оболочек к внешним возмущениям рассматриваемого вида. Были испытаны 922 цилиндрические оболочки, изготовленные путем точечной сварки из листовой стали марки X18H9H; $E=2 \cdot 10^4$ кг/мм², $\sigma_{0.2}=8,4$ кг/мм². Радиус оболочек $R=57$ мм, длина $L=130$ мм. Создавали условия закрепления, близкие к шарнирному опиранию. Внешнее избыточное давление обеспечивалось вакуум-насосом, его регистрировали образцовым вакуумметром.

Был принят следующий порядок испытаний. Оболочку нагружали равномерным внешним давлением заданной величины. Затем по боковой поверхности оболочки наносили удар свободно падающим шариком. Поэтапное изменение величины внешнего давления и высоты падения шарика позволило установить после серии опытов условия существования различных закритических равновесных форм и энергии, необходимой для реализации перескока к рассматриваемой форме. Чтобы при анализе экспериментальных данных выделить равновесные формы, существование которых связано с возникновением интенсивных пластических деформаций, испытывали оболочки с различным значением относительной толщины ($h_1/R=0,0044$; $h_2/R=0,0035$, $h_3/R=0,0022$).

Как показал эксперимент, при вышучивании оболочки, нагруженной равномерным внешним давлением и испытывающей действие локальных поперечных возмущений, образуется замкнутый пояс из шести вмятин, либо же одна или несколько вмятин. Длина полуволны в осевом направлении во всех случаях равна длине оболочки. Результаты испытаний представлены в графической форме на рис. 1. По оси ординат отложен безразмерный параметр кольцевых сжимающих напряжений $\bar{\sigma}_2=\sigma_2/\sigma_2^*$ (σ_2^* — критическое напряжение, определенное по линейной теории), по оси абсцисс η_0 — энергия внешнего возмущения, отнесенная к энергии упругой деформации оболочки в докритическом состоянии при $\sigma_2=\sigma_2^*$. Поскольку количество испытанных оболочек весьма велико, на рис. 1 приведены осредненные графические зависимости, при этом кривые 1, 2, 3 относятся соответственно к оболочкам с относительной толщиной h_1/R , h_2/R , h_3/R .

При значениях $\bar{\sigma}_2 > 0,7$ и соответствующей энергии внешнего воздействия реализуется лишь общая форма потери устойчивости (замкнутый пояс вмятин). Область общей потери устойчивости ограничена снизу сплошными линиями, которые для оболочек с указанными выше значениями h/R практически совпадают, что свидетельствует о возможности упругой трактовки соответствующих экспериментальных данных. Образование одной вмятины при указанных значениях кольцевых сжимающих напряжений влечет за собой выпучивание по всей поверхности оболочки.

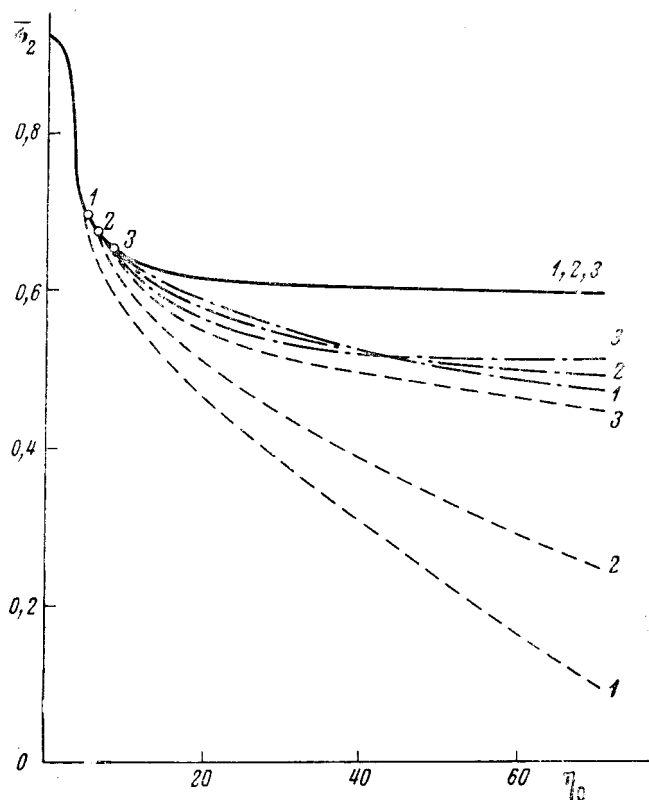


Рис. 1

При $0,7 \geq \bar{\sigma}_2 > 0,6$, в зависимости от энергии внешнего возмущения, реализуются либо общая, либо локальные формы выпучивания. Штрих-пунктирные кривые соответствуют верхней, а штриховые — нижней границе области, в которой возможно выпучивание с образованием лишь одной вмятины. Коэффициент нижнего критического напряжения для общей формы выпучивания составляет $\bar{\sigma}_2 \approx 0,6$ и является достаточно стабильной величиной. Отметим, что, в то время как кривые, ограничивающие сверху область реализации формы выпучивания с одной вмятиной, достаточно близки для оболочек с различными относительными толщинами, соответствующие нижние граничные кривые заметно различаются. При $\bar{\sigma}_2 < 0,6$ возможны локальные формы выпучивания в виде одной вмятины, либо нескольких связанных вмятин (но не общее выпучивание). На рис. 1 область, ограниченная сплошной и штрих-пунктирной кривыми, соответствует локальным формам выпучивания с двумя и более вмятинами.

При всех значениях кольцевого напряжения, меньших верхнего критического, в некотором диапазоне энергий внешнего возмущения оболочка после удара возвращается в исходное равновесное состояние. Результаты эксперимента позволяют выделить случаи, когда выпучивание существенным образом связано с интенсивными пластическими деформациями и его

нельзя рассматривать как упругое. Наиболее отчетливо влияние пластических деформаций проявилось при определении нижних границ областей выпучивания (штриховые кривые). Для оболочек с различными значениями относительной толщины эти границы существенно различаются, что особенно заметно при уменьшении уровня кольцевых напряжений. Что же касается верхних границ областей, в которых имеет место форма выпучивания с образованием одной вмятины, то в исследованном диапазоне энергии внешнего возмущения они оказались достаточно близкими. Однако при $\bar{\sigma}_2 \approx 0,53$ наблюдается их инверсия, и в дальнейшем заметна тенденция к большему расхождению верхних граничных кривых. При этом кривые, соответствующие большим значениям относительной толщины, как и в случае нижней границы, убывают быстрее, что свидетельствует о возрастании роли пластических деформаций.

Как показал эксперимент, дальнейшее увеличение внешнего давления после образования одной или нескольких связанных вмятин приводит к общему выпучиванию при $\bar{\sigma}_2 \approx 0,6$. Следовательно, нижнее критическое напряжение, соответствующее общей форме выпучивания, является достаточно надежной границей несущей способности оболочки даже при весьма значительных внешних возмущениях. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что оболочка, нагруженная внешним давлением, обладает гораздо меньшей чувствительностью к внешним возмущениям по сравнению со случаем осевого сжатия ⁽¹⁾. Очень существенное различие наблюдается как вблизи верхних критических напряжений, так и при более низких уровнях нагружения. Относительные величины энергетических барьеров, которые необходимо преодолеть при переходе к закритическим формам равновесия, в случае внешнего давления существенно выше, чем при осевом сжатии. Исходя из назначения конструкции и конкретных условий эксплуатации имеет смысл ограничить уровень возмущений некоторой разумной величиной. Так, если принять $\eta_0 \leq 1$, то соответствующие напряжения выпучивания оказываются достаточно близкими к верхнему критическому напряжению, что оправдывает обычно применяемые методы расчета оболочек, нагруженных внешним давлением.

Днепропетровский государственный университет
им. 300-летия воссоединения Украины с Россией

Поступило
2 VII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Моссаковский, Л. И. Маневич, Е. Ф. Прокопало, ДАН, т. 206, № 2, 297 (1972). ² В. Budiansky, J. Amazigo, J. Math. and Phys., v. 47, № 3, 223 (1968).