

Академик АН УССР В. И. МОССАКОВСКИЙ, Л. И. МАНЕВИЧ, Е. Ф. ПРОКОПАЛО

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Теоретические и экспериментальные исследования последних лет (¹⁻⁶) показали, что учет влияния начальных погибов и неравномерности нагружения позволяет предсказать критические нагрузки сжатой цилиндрической оболочки, наблюдаемые при лабораторном эксперименте. Однако несущая способность такой конструкции в реальных условиях эксплуатации может оказаться существенно ниже в силу ее высокой чувствительности к различного рода дополнительным возмущениям (вибрации, локальные удары, пульсации аэродинамического давления). Этот факт обуславливает интерес к исследованию закритической деформации оболочек и условий перескока к новым равновесным конфигурациям.

Теоретические исследования в рассматриваемой области относятся, главным образом, к изучению начальной стадии послекритической деформации и определению нижней критической нагрузки в предположении, что волнообразование распространяется на всю поверхность (⁷⁻¹¹). При этом коэффициенты нижней критической нагрузки имеют весьма малые величины и стремятся к нулю при стремлении к нулю относительной толщины оболочки. Поскольку, однако, соответствующие перемещения и энергетические барьеры очень велики, перескок к таким формам выпучивания представляется сомнительным и возникает вопрос о существовании «ближних» равновесных конфигураций со сравнительно небольшими энергетическими барьерами (¹²).

Результаты экспериментов (¹³) свидетельствуют о том, что наряду с общей формой выпучивания могут иметь место и локальные формы, в частности, в виде отдельной вмятины. Но условия существования и устойчивости различных закритических форм сжатой оболочки с учетом возможности образования нескольких связанных вмятин на участке дуги поперечного сечения не изучены ни экспериментально, ни теоретически. Не изучен с этой точки зрения и случай совместного действия осевого сжатия и внутреннего давления, представляющий особый интерес.

Отмеченные выше факты обусловили постановку экспериментального исследования, целями которого являются:

- 1) классификация закритических форм равновесия сжатой цилиндрической оболочки;
- 2) определение нижних критических нагрузок, соответствующих этим равновесным конфигурациям;
- 3) определение энергетических барьеров, которые необходимо преодолеть для реализации перескока к различным формам выпучивания, и выделение «ближних» форм выпучивания, которым соответствуют минимальные энергетические барьеры;
- 4) исследование устойчивости закритических равновесных конфигураций и определение несущей способности оболочки после перескока к закритическим формам равновесия;
- 5) исследование влияния внутреннего давления на закритическое поведение сжатой оболочки.

Проведенное исследование обобщает результаты испытаний 254 цилиндрических оболочек. Материал оболочек — стальная нержавеющая лента марки Х18Н9н. Модуль упругости стали $E = 1,73 \cdot 10^6$ кг/см², предел текучести $\sigma_{0.2} = 84$ кг/мм². Радиус оболочек $R = 25$ мм, длина $L = 44$ мм,

толщина $h = 0,088$ мм. Изготовление оболочек производилось путем точечной сварки. Для обеспечения условий жесткого заземления оболочки приклеивались к торцовым заглушкам клеем, изготовленным на основе эпоксидной смолы. Испытания проводились на специально спроектированной установке, обеспечивающей постоянство осевой силы в момент выпучивания оболочки и позволяющей реализовать возмущения в виде локального поперечного удара.

Результаты испытаний сжатых оболочек показали, что при локальном ударном возмущении (удар по боковой поверхности оболочки производился свободно падающим шариком) выпучивание происходит с образованием

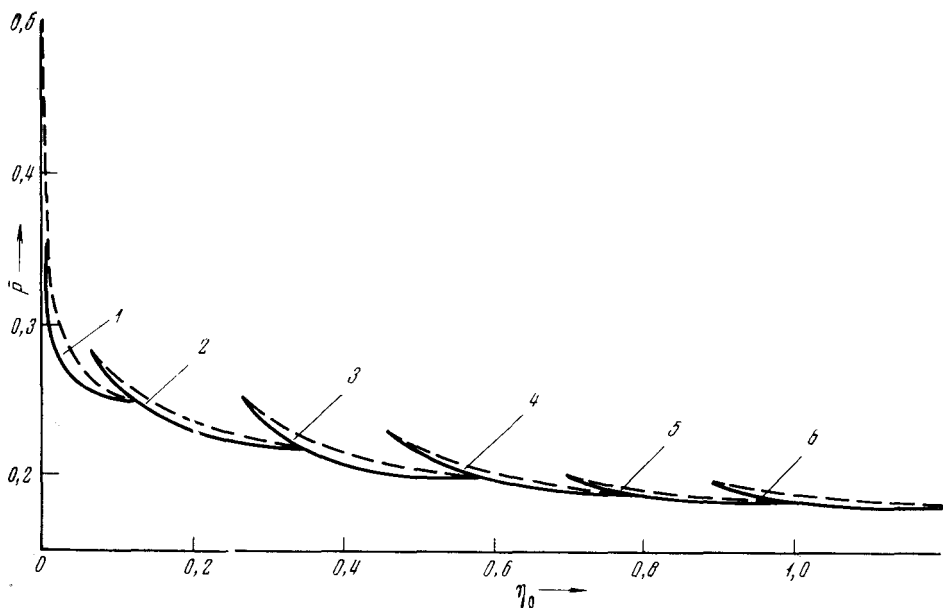


Рис. 1

либо одной, либо нескольких связанных вмятин, расположенных в одном поясе по длине оболочки, или же наблюдается потеря несущей способности с образованием двух поясов вмятин по длине. Тот или иной характер выпучивания определяется величиной осевых сжимающих напряжений в начальной равновесной конфигурации оболочки и уровнем энергии внешнего возмущения.

На рис. 1 показаны области устойчивости заkritических форм равновесия. Поскольку количество испытанных моделей весьма велико, здесь не нанесены результаты испытаний каждой оболочки, а представлены осредненные графические зависимости. По оси абсцисс отложена величина энергии внешнего возмущения, отнесенная к энергии накопленной в оболочке в результате действия осевой силы (η), по оси ординат — безразмерный параметр осевых сжимающих напряжений ($\bar{p} = pR / (Eh)$, где p — осевое напряжение). Цифрами 1—6 указаны области устойчивости заkritических форм равновесия соответственно с одной, двумя, и т. д. локальными вмятинами.

Таким образом, экспериментально показано существование серии локальных заkritических форм равновесия сжатой цилиндрической оболочки и определена, в зависимости от величины осевой нагрузки, энергия внешнего локального возмущения, необходимая для перескока оболочки от исходного состояния к той или иной заkritической конфигурации. Области существования заkritических форм равновесия ограничены верхним ($\bar{p}^*$) и нижним ($\bar{p}_*$) критическими напряжениями. С увеличением числа связанных вмятин уменьшается интервал между $\bar{p}^*$ и $\bar{p}_*$ и вместе с

тем резко возрастают энергетические барьеры, которые необходимо преодолеть при переходе к соответствующим закритическим формам. Практический смысл (в случае локальных возмущений) имеет учет возможности перескока к «ближней» форме выпучивания с образованием одной вмятины (или системы несвязанных вмятин). Для этой закритической формы коэффициент нижней критической нагрузки $p_* = 0,25$. Соответствующий энергетический барьер составлял $\sim 10\%$ от величины энергии деформации оболочки в докритическом состоянии.

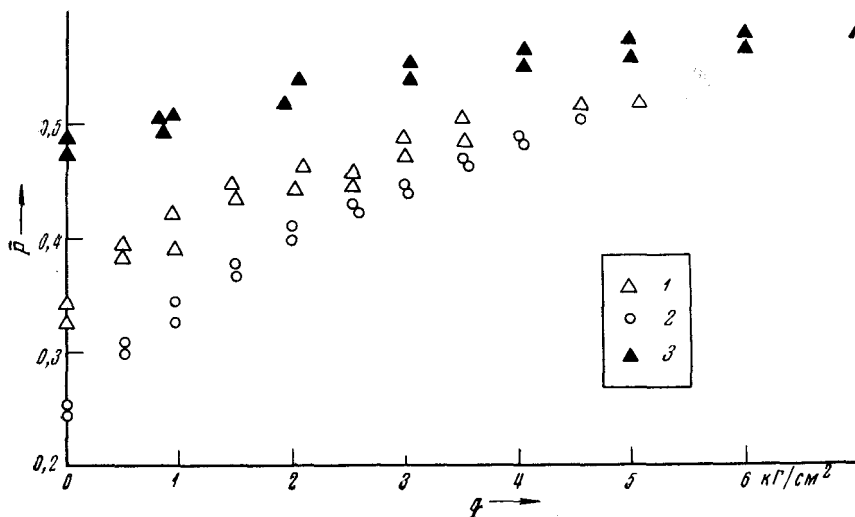


Рис. 2

Расчет энергетических барьеров проводился двумя способами: 1) непосредственно по параметрам соответствующего внешнего возмущения; 2) по определенным в результате испытаний геометрическим характеристикам формы выпучивания (при этом определялась полная энергия системы с использованием известной аппроксимации закритических форм поверхностями, изометричными цилиндрической поверхности⁽⁸⁾). Соответствие оказалось вполне удовлетворительным.

На рис. 2 приведены результаты экспериментального исследования влияния внутреннего давления q на верхние $\bar{p}^*(1)$ и нижние $\bar{p}^*(2)$ критические напряжения для закритической формы равновесия оболочки с одной локальной вмятиной. Здесь же представлены результаты испытаний оболочек на осевое сжатие и внутреннее давление при отсутствии внешних возмущений (3).

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

Поступило
30 IV 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ W. T. Koiter, Proc. Koninkl. nederl. Akad. wet. B, 66, 265 (1963). ² С. Н. Кан, Тр. IV Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин, Ереван, 1964, стр. 489. ³ Л. И. Маневич, Е. Ф. Прокопало, Сборн. Проблемы надежности в строительной механике, Вильнюс, 1968, стр. 182. ⁴ Р. Е. Гейзенблазен, Л. И. Маневич и др., Изв. АН СССР, Мех. тверд. тела, № 6, 119 (1969). ⁵ Л. И. Маневич, Е. Ф. Прокопало, Тр. VIII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластинок (Днепропетровск, 1969), «Наука», 1970, стр. 413. ⁶ Р. Теннисон, Д. Маггеридж, Ракетная техника и космонавтика, № 11, 101, 1969. ⁷ J. W. Hutchinson, W. T. Koiter, Appl. Mech. Rev., 23, № 12, 1353 (1970). ⁸ А. В. Погорелов, Геометрическая теория устойчивости оболочек, «Наука», 1966. ⁹ Н. Хофф, В. А. Мэдсен, И. Мейерс, Ракетная техника и космонавтика, № 1, 161 (1966). ¹⁰ В. Г. Паламарчук, Тр. VIII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластинок (Днепропетровск, 1969), «Наука», 1970, стр. 460. ¹¹ В. И. Этоков, Прикл. мех., 8, в. 2, 60 (1972). ¹² А. С. Вольмир, Устойчивость деформируемых систем, «Наука», 1967. ¹³ С. А. Владимиров, В. И. Конохи и др., Изв. АН СССР, Мех. тверд. тела, № 4, 158 (1969).