

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

О ВЛИЯНИИ ХАРАКТЕРА ЛОКАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ДЛЯ СЖАТЫХ ОБОЛОЧЕК

В работах (¹, ²) выявлена серия закритических форм равновесия продольно сжатой оболочки, реализуемых при внешнем динамическом возмущении типа локального удара. Каждой из возможных закритических конфигураций соответствуют определенные энергетические барьеры, которые преодолеваются при перескоке к данной форме.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию зависимости энергетического барьера от характера локального поперечного возмущения, в частности, от его динамичности. Очевидно, с точки зрения динамичности внешнего воздействия, ударное и квазистатическое возмущения являются крайними случаями, которые целесообразно исследовать в первую очередь. При этом будем различать квазистатические возмущения силового и кинематического типа (³, ⁴). Проведенное экспериментальное исследование преследовало следующие цели:

- 1) исследование кривых «энергетический барьер — сжимающее напряжение» в зависимости от характера локального возмущения для оболочки, нагруженной осевым сжатием либо равномерным внешним давлением,
- 2) сопоставление величин энергетических барьеров для указанных выше трех типов локального возмущения.

Испытаниям подвергались изотропные цилиндрические оболочки, изготовленные путем точечной сварки из листовой стали марки Х18Н9. На осевое сжатие испытано 68 оболочек, на внешнее давление — 62 оболочки. Модуль упругости стали $E=2 \cdot 10^6$ кг/мм². Радиус оболочки $R=57$ мм, длина $L=130$ мм, номинальная толщина $\delta_0=0,2$ мм. Действительная толщина каждой оболочки δ определялась индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм. Условия закрепления были близки к шарнирному опиранию. Осевое сжатие осуществлялось на установке, обеспечивающей постоянство осевой силы в момент выпучивания оболочки. Внешнее давление создавалось вакуум-насосом и регистрировалось образцовым вакуумметром. Для реализации квазистатического поперечного воздействия, как кинематического, так и силового, было спроектировано специальное приспособление. Удар по боковой поверхности оболочки осуществлялся свободно падающим шариком.

Была принята следующая схема проведения эксперимента. При исследовании влияния ударных возмущений оболочка нагружалась осевой силой или внешним давлением, затем по ее боковой поверхности наносился удар шариком. Изменяя высоту падения шарика, можно было определить то значение энергии внешнего возмущения, при котором наступало выпучивание оболочки. Таким образом определялись энергетические барьеры для ряда значений осевых и кольцевых сжимающих напряжений. При квазистатических возмущениях энергетические барьеры определялись по диаграмме «поперечное возмущение — прогиб» (рис. 1). Площадь, ограниченная кривой OAC и осью абсцисс, соответствует энергии, которую необходимо сообщить оболочке при локальном кинематическом поперечном воз-

действии для реализации процесса выпучивания. Если поперечное возмущение создается «мертвым грузом» (силовое воздействие), величина энергетического барьера соответствует площади фигуры $OABC$.

Рассмотрим характерную диаграмму «поперечная сила — прогиб», соответствующую некоторому значению кольцевых сжимающих напряжений (рис. 1). Ветвь OA диаграммы определялась путем поэтапного нагружения оболочки «мертвым грузом». Для каждого значения поперечной силы Q

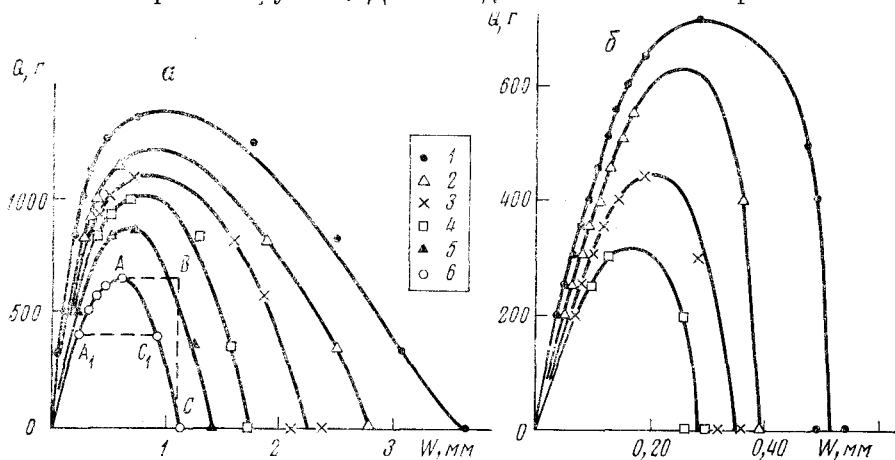


Рис. 1

по индикатору определялась величина прогиба W . В верхней части кривой (точка A , $Q=Q_0$, $W=W_0$) происходило выпучивание оболочки. Для построения ветви AC использовался следующий прием. Оболочка нагружалась поперечной силой $Q < Q_0$. Затем осуществлялось кинематическое воздействие (путь A_1-C_1). В точке C_1 происходил хлопок. В момент хлопка фиксировалось перемещение W_0 . Таким образом, задаваясь рядом значений $Q < Q_0$, можно было получить несколько точек, принадлежащих ветви AC .

Результаты экспериментов представлены в графической форме на рис. 1–3. Кривые 1–6 на рис. 1а соответствуют значениям $\bar{q}=0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85$, $\bar{q}=q/q_*$, q_* — значение внешнего давления, при котором строилась данная кривая, $q_*=0,92 ER^{-2/3} L^{-1/3} \delta^{2/3}$. Кривые 1–4 на рис. 1б соответствуют значениям $K=0,29; 0,32; 0,35; 0,38$, $K=P \cdot (2\pi E \delta^2)^{-1}$, P — величина осевой силы, для которой строилась соответствующая кривая. На рис. 2 приведены экспериментальные значения энергетических барьеров в зависимости от уровня кольцевых (рис. 2а) и осевых (рис. 2б) сжимающих напряжений. Здесь η — энергия внешнего возмущения, отнесенная к энергии деформации оболочки в докритическом состоянии при $\bar{q}=1$ (внешнее давление) и при $K=0,605$ (осевое сжатие). Цифрами 1–3 отмечены кривые, соответствующие ударному, силовому и кинематическому возмущению. На рис. 3 представлены отношения энергетических барьеров при ударном (1) и силовом (2) возмущении к энергетическому барьеру при кинематическом возмущении (3).

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1. Качественный характер зависимости «энергетический барьер — сжимающее напряжение» (рис. 2) практически не изменяется, если вместо ударного поперечного возмущения оболочка подвергается квазистатическому поперечному воздействию (силового либо кинематического типа). Это наблюдается как в случае равномерного осевого сжатия, так и при нагружении оболочки равномерным внешним давлением.

2. Количественно величины энергетических барьеров изменяются таким образом, что их максимальные значения соответствуют ударному,

а минимальные — квазистатическому кинематическому возмущению. Квазистатическое силовое возмущение занимает промежуточное положение (рис. 2). При заданных безразмерных геометрических параметрах оболочек, достаточно близких к наиболее часто встречающимся в практике проектирования конструкций, не менее половины энергии возмущения при локальном ударе идет на образование закритических вмятин, оставшаяся часть энергии обуславливает затухающий волновой процесс в системе.

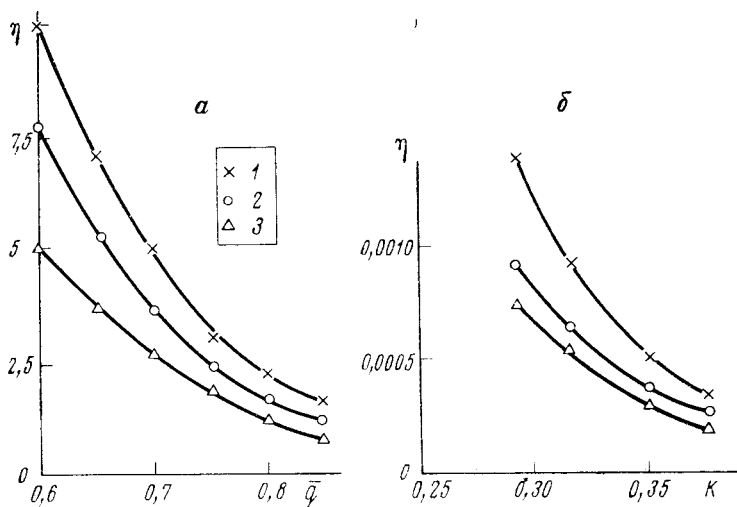


Рис. 2

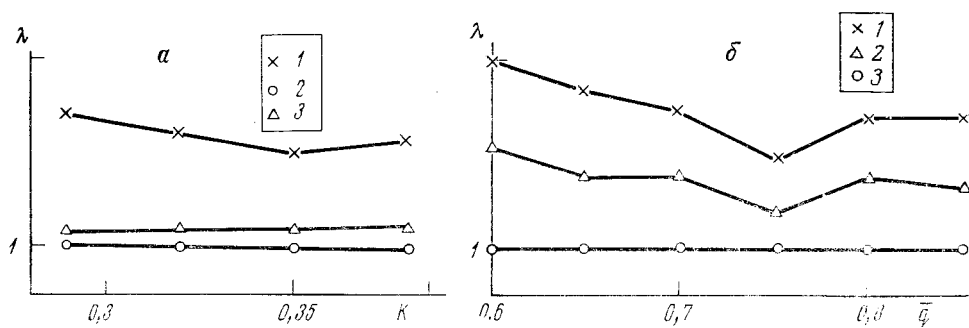


Рис. 3

В случае осевого сжатия энергетические барьеры при двух видах квазистатического локального воздействия (силовом и кинематическом) отличаются незначительно; для оболочки, нагруженной внешним давлением, расхождение может достигать 50%. Важно отметить, что в обоих случаях нагружения (осевое сжатие и внешнее давление) отношения энергетических барьеров при динамическом и силовом воздействиях к энергетическому барьеру при кинематическом воздействии остаются стабильными при изменении уровня сжимающих напряжений (рис. 3).

3. Полученные экспериментальные (квазистатические) зависимости «возмущающая сила — амплитуда прогиба» объясняют близкое соответствие квазистатических энергетических барьеров при силовом и кинематическом воздействиях для продольно сжатой оболочки и более значительное их расхождение в случае оболочки, нагруженной внешним давлением. В последнем случае соответствующие кривые гораздо сильнее вытянуты вдоль оси абсцисс.

4. При оценке энергетических барьеров для сжатой оболочки, подверженной локальным возмущениям, можно ориентироваться на величину барьера при квазистатическом кинематическом возмущении. Возможные отклонения от этой величины, связанные с силовым либо динамическим характером воздействия, находятся в пределах погрешности, с которой на практике можно определять энергию возможного внешнего возмущения.

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

Поступило
30 XII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. И. Моссаковский, Л. И. Маневич, Е. Ф. Прокопало, ДАН, т. 206, № 2, 297 (1972). ² Л. И. Маневич, В. М. Моссаковский, Е. Ф. Прокопало, Сб. IX Всесоюз. конфер. по теории оболочек и пластин, Аннотация докл., Л., 1973, стр. 49. ³ В. М. Панферов, В. К. Тринчер, Сб. III Всесоюз. съезд по теор. и прикл. механ., 1968. Аннотации докл., М., 1968, стр. 237. ⁴ В. И. Конох, В. Л. Красовский, Сб. IX Всесоюз. конфер. по теории оболочек и пластин, Аннотации докл., Л., 1973, стр. 39.