

Академик АН УССР В. И. МОССАКОВСКИЙ, Л. В. АНДРЕЕВ,
Н. И. ОБОДАН, А. Г. ПАЦЮК

О ЛОКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, НАГРУЖЕННЫХ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СИЛОЙ

Исследования несущей способности гладких тонкостенных оболочек, нагруженных неосесимметричными локальными распределенными нагрузками (¹⁻³), показали, что при некотором параметре нагрузки возможен переход оболочки в новое устойчивое равновесное состояние.

Вопрос о выборе единой расчетной схемы при таких нагрузках, т. е. возможность той или иной степени идеализации («жесткая» расчетная схема, линейаризация докритического состояния), пока остается открытым, поскольку для локальных нагрузок невозможно предугадать не только определяющие факторы при потере устойчивости, но и ее существование.

Экспериментальные и теоретические исследования, выполненные для локального полосового нагружения и нагружения по площадке, косвенно подтвердили необходимость учитывать моментность начального состояния, докритическое изменение контура поперечного сечения и возможность линейаризации, так как в экспериментах начальное состояние не измерялось, а совпадение результатов эксперимента и расчета с точностью до 20% не является критерием корректности принятой расчетной схемы. Для других видов нагружения такой анализ не был проведен вообще. При исследовании механизма потери устойчивости в зависимости от начального состояния, выяснения возможности принятия «жесткой» расчетной схемы и линейаризации докритического состояния принципиально важно выбрать характерную нагрузку, при которой указанные факторы могут оказать существенное влияние на значение критической нагрузки.

Анализ опубликованных работ и пробные эксперименты подсказали схему нагружения: оболочка, подкрепленная опорными кольцами, под действием радиальной сосредоточенной силы. При таком нагружении происходит потеря устойчивости с образованием локальных вмятин, причем эта форма определяется закреплением торцов. Это показали сравнительные испытания тех же оболочек со свободными в осевом направлении краями. В этом случае смены форм равновесия не наблюдалось, а оболочка изгибалась до полного разрушения. Испытания проводились для двух способов закрепления: двухопорного и консольного. В первом оболочка опиралась шпангоутами на ложементы, во втором устанавливалась вертикально и крепилась нижним торцом к основанию для исключения возникающих в зоне нагружения при двухточечном опирании осевых сжимающих усилий от изгиба.

Радиальная сосредоточенная сила создавалась нитью, которая пропускалась через малое отверстие в оболочке и закреплялась на ней с помощью шайбы. Испытания проводились на оболочках из стали Х18Н9Н. В процессе испытаний под силой по мере ее роста наблюдалось увеличение ромбовидной вмятины. Остальная часть поверхности практически не деформировалась. При достижении нагрузкой некоторого «критического» значения резко «хлопком» происходило образование мелких ромбовидных вмятин на прилегающих областях недеформированной поверхности. Зафиксированы различные формы волнообразования: одна в средней части (рис. 1) или три по длине оболочки (рис. 2) мелких ромбовидных локаль-

ных вмятин, симметричных относительно образующей, в центре которой приложена сила. На рис. 3 приведены результаты испытаний оболочек с $R/h=570$ для консольного закрепления (кривая 2) и двухопорного опирания (кривая 1).

Было установлено, что на характер и расположение локальных вмятин влияют геометрические параметры оболочки. Наблюдаемый при потере устойчивости характер волнообразования связан, в свою очередь, с величиной «критической» нагрузки.

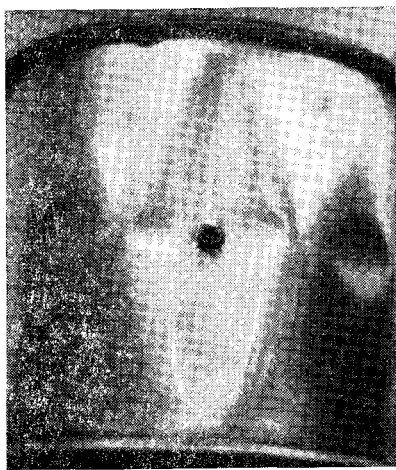


Рис. 1

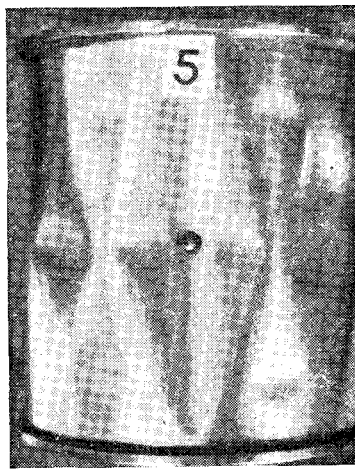


Рис. 2

Известно (⁴), что при малых перемещениях напряженно-деформированное состояние оболочки под действием радиальной силы может быть определено по безмоментной или полубезмоментной теории везде, за исключением узкой области в зоне нагружения. С ростом перемещений в зоне нагрузки при ограничении продольных смещений в оболочке возникают дополнительные циклические продольные усилия, которые аналогичны усилиям при циклическом осевом сжатии. Это подтверждает и аналогичный характер потери устойчивости, наблюдаемый при данном эксперименте и при осевом сжатии. Тем не менее определенные по безмоментной теории для «критического» значения силы продольные усилия во много раз меньше «критического» усилия сжатия. Это означает, что действующие продольные усилия, определяющие потерю устойчивости, могут быть найдены только с учетом углов поворота, т. е. с помощью нелинейного расчета.

В диапазоне длин, соответствующих участку кривой AB (рис. 3), потеря устойчивости сопровождалась образованием двух локальных вмятин в средней части оболочки. В этом случае оболочка теряла устойчивость от циклических напряжений сжатия, которые для коротких оболочек невелики, в зоне наибольшего изменения кривизны. Эффект предварительного изгиба перед потерей устойчивости наблюдался визуально, что дает основание считать докритическое изменение кривизны оболочки «ответственным» за потерю устойчивости.

Для диапазона длин участка BC смена форм происходит с образованием шести симметричных вмятин. Характер потери устойчивости с одновременным образованием трех локальных вмятин по длине свидетельствует, что в этом случае определяющими являются сжимающие напряжения. С ростом параметра L/R (участок CD) «ответственность» за потерю устойчивости переходит опять к докритическому изменению формы. При дальнейшем увеличении длины оболочки потери устойчивости не наблюдается.

Качественно аналогичные результаты получены при испытаниях оболочек, нагруженных двумя и четырьмя сосредоточенными силами.

На основании проведенных испытаний установлено следующее:

1) существует класс нагрузок, для которых наряду с сильным изгибом оболочки, возможно возникновение новых форм равновесия; появление вмятин может привести к исчерпанию несущей способности; докритическое состояние в момент смены форм существенно нелинейно;

2) возможность возникновения новых форм равновесия, в частности, при действии радиальной сосредоточенной силы существенным образом зависит от условий закрепления. В закрепленной определенным образом от продольных смещений оболочке при локальном изгибе возникают циклические осевые сжимающие усилия, вызывающие потерю устойчивости, аналогичную потере устойчивости при циклическом и неравномерном осевом сжатии ⁽⁵⁾;

3) при определении «критических» параметров нагрузки принятие жесткой расчетной схемы возможно только тогда, когда за потерю устойчивости «ответственно» напряженное состояние. В этом случае бифуркационный прогиб имеет спектр, далекий от спектра докритического прогиба, поэтому влиянием последнего можно пренебречь ⁽⁶⁾. Когда за потерю устойчивости «ответственна» докритическая форма оболочки, т. е. либо спектр бифуркационного прогиба близок к спектру начального, и происходит явление, похожее на резонанс, либо бифуркация вообще отсутствует и имеет место предельное состояние, принятие «жесткой» расчетной схемы недопустимо. Линеаризация докритического состояния также не всегда возможна.

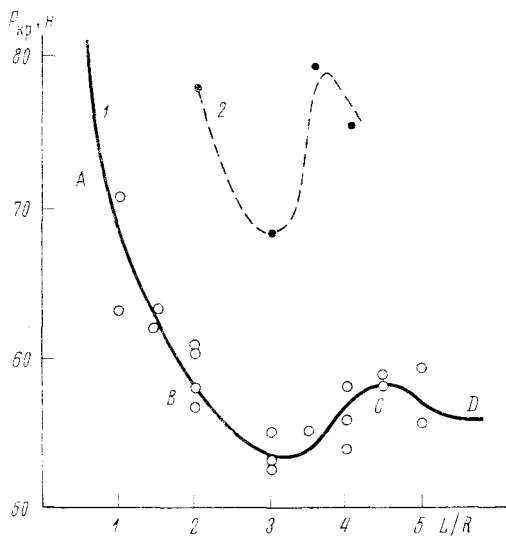


Рис. 3

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

Поступило
3 III 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. В. Андреев, В. И. Моссаковский, Н. И. Ободан, Тр. VII Всесоюзн. конф. по теории оболочек и пластин, М., «Наука», 1970. ² А. Н. Кудинов, В. И. Муравичский, Там же, 1970. ³ В. М. Коц, Д. Е. Липовский, Теория пластин и оболочек, М., «Наука», 1971. ⁴ Г. Н. Чернышев, Тр. VII Всесоюзн. конф. по теории оболочек и пластин, М., «Наука», 1970. ⁵ В. Л. Красовский, Сопротивление материалов и теория сооружений, в. 16, 1972, стр. 170. ⁶ В. В. Болотин, Проблемы механики твердого деформируемого тела, Л., 1970.