

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ОСЕВОМ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

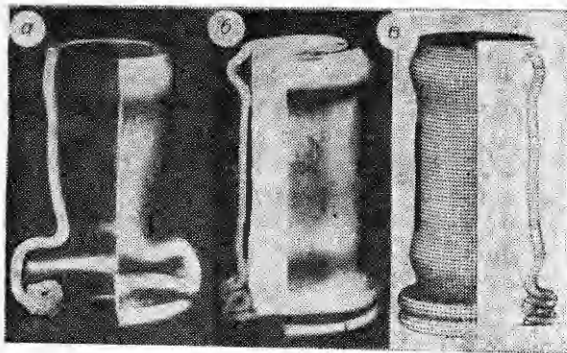
А. И. Абакумов, Г. А. Квасков, С. А. Новиков,  
В. А. Синицын, А. А. Учайев

(Москва)

Исследование динамической устойчивости цилиндрических оболочек при действии осевых интенсивных ударных нагрузок представляет большой практический интерес. Оболочка считается динамически устойчивой, если ее движение не сопровождается выпучиванием, т. е. является ограниченным. Характер потери устойчивости цилиндрической оболочки определяется в основном ее относительной толщиной  $h/R$  ( $h$  — толщина оболочки,  $R$  — радиус срединной поверхности). Для относительно тонких оболочек при  $h/R < 1/100$  обычно рассматривается упругое выпучивание, когда потеря устойчивости происходит с образованием ромбических вмятин, а изгибание оболочки — в результате резкого прощелкивания. При увеличении относительной толщины оболочки в процессе осевого сжатия наблюдается ее пластическое выпучивание. Пластическая потеря устойчивости характеризуется тем, что оболочка может оказывать заметное сопротивление выпучиванию. На начальной стадии деформирования при пластическом выпучивании почти всегда происходит осесимметричная потеря устойчивости в виде кольцевой складки, вызываемой влиянием граничных условий на краях оболочки. При дальнейшем осевом сжатии оболочка продолжает терять устойчивость по осесимметричной форме или может перейти на асимметричную форму потери устойчивости. В [1] экспериментально показано, что форма потери устойчивости зависит от относительной толщины оболочки, в частности, для алюминиевых оболочек переход от осесимметричной формы потери устойчивости к асимметричной наблюдается при  $h/R < 1/5$ . Анализ механизма потери устойчивости показывает, что для образования осесимметричной формы при  $h/R < 1/5$  необходимо, чтобы сжимающие кольцевые напряжения уравнивались внутренним давлением, способным блокировать развитие асимметрии в оболочке при ее прогибах. Внутреннее давление в оболочке при деформировании может быть создано за счет заполнения ее полости сжимаемым (например, пористым) материалом. Получение стабильной осесимметричной формы потери устойчивости позволяет для описания поведения цилиндрической оболочки при ударном нагружении использовать методики расчета упругопластического деформирования оболочек вращения при осесимметричном динамическом нагружении. Вид цилиндрических оболочек после осевого ударного сжатия с асимметричной ( $a$  — опыт 3, см. таблицу) и осесимметричной ( $b$  — при наличии внутреннего давления опыт 2,  $c$  — расчет) формами потери устойчивости показан на рис. 1.

Проведены эксперименты с цилиндрическими оболочками из алюминиевого сплава АМг6, изготовленными из стандартных труб. Геометрические размеры оболочек:  $R = 9,3$  мм,  $h = 1,5$  мм, длина  $l = 80$  мм. Нагружение оболочек осуществлялось ударом по торцу металлической пластиной-ударником. Другим торцом оболочка опиралась на неподвижную опору — мерный стержень (динамометр). Измерение усилия сжатия в каждом опыте, так же как и в [1], производилось с помощью тензодатчиков, наклеенных на динамометр. Для осуществления устойчивой осесимметричной формы деформирования внутренний объем оболочки заполнялся пористым материалом плотностью  $\rho = 0,2$  г/см<sup>3</sup>. Основные параметры нагружения оболочек представлены в таблице.

Вопросу численного описания осесимметричного упругопластического выпучивания оболочек посвящен ряд работ [2—7], в которых при



Р и с. 1

Номер опыта	Масса ударника, г	Начальная скорость, м/с	Смятие оболочки, %
1	245	70	25
2	390	70	39
3 *	390	70	45
4	730	65	62

\* Опыт без заполнителя.

ударном нагружении рассматривался процесс поведения оболочек только на начальной стадии формирования складки. Слож-

ность решения задачи при описании формирования складок заключается в необходимости учета в зоне складки контактных усилий и напряженно-деформированного состояния по толщине оболочки. Если в качестве конечного результата брать только интегральные характеристики, такие как формоизменение оболочки и реакция опоры, то необходимость достаточно точного знания напряженно-деформированного состояния в зоне складки отпадает. Это дает возможность формирование складки описывать приближенно, используя условие взаимного непроникания элементов оболочки. Исходя из этого была предложена модель формирования складок цилиндрических оболочек при ударном нагружении. В основе модели лежит методика [6], базирующаяся на теории оболочек типа Тимошенко, теории пластического течения и вариационно-разностном методе численного решения. Большие прогибы учитываются пошаговой перестройкой положения срединной поверхности оболочки. В модели начиная с момента времени, при котором в оболочке возникает прогиб, превышающий ее толщину, ведется контроль за характером выпучивания. Процесс контроля включает в себя:

а) определение счетных узлов оболочки, попадающих в вершины и впадины образующихся складок;

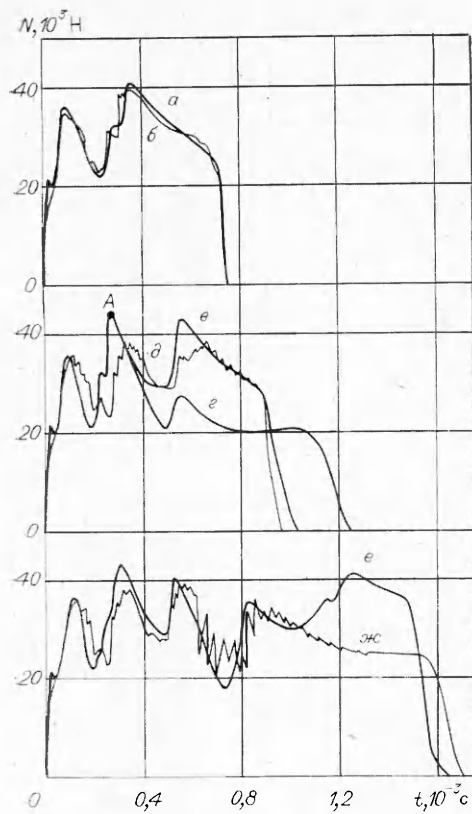
б) выявление возможного замыкания части поверхности оболочки (внутренней и наружной) при формировании складки. Согласно экспериментам, количество анализируемых складок должно быть не менее двух с обоих краев оболочки. При этом процесс замыкания для данного нагружения раньше всего заканчивается у той складки, которая расположена ближе к краю оболочки со стороны неподвижной опоры.

При выявлении в расчете замыкания некоторой части складки осуществляется пересчет продольной скорости для каждой контактирующей пары узлов путем осреднения их скоростей в момент контакта. Для узлов, контактирующих с ударником или опорой, скорость приравнивается скорости ударника или опоры соответственно. Сила торможения ударника берется равной продольной силе сопротивления деформированной оболочки в зоне, удаленной от области узлов, находящихся в контакте.

Следует отметить, что расчетные данные достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов, когда граничными условиями для краев оболочки являются условия их шарнирного крепления с неподвижной опорой и ударником.

Сравнение расчетных величин с экспериментальными проводилось по двум параметрам: временной зависимости усилия сжатия  $N = N(t)$  и остаточной форме оболочки. На рис. 2 приведены экспериментальные (*a, в, г, е* — для опытов 1—4) и расчетные (*б, д, ж* — для условий нагружения в опытах 1, 2, 4) зависимости  $N = N(t)$ .

Использование пористого заполнителя для создания внутреннего давления в оболочке способствовало осесимметричному выпучиванию на



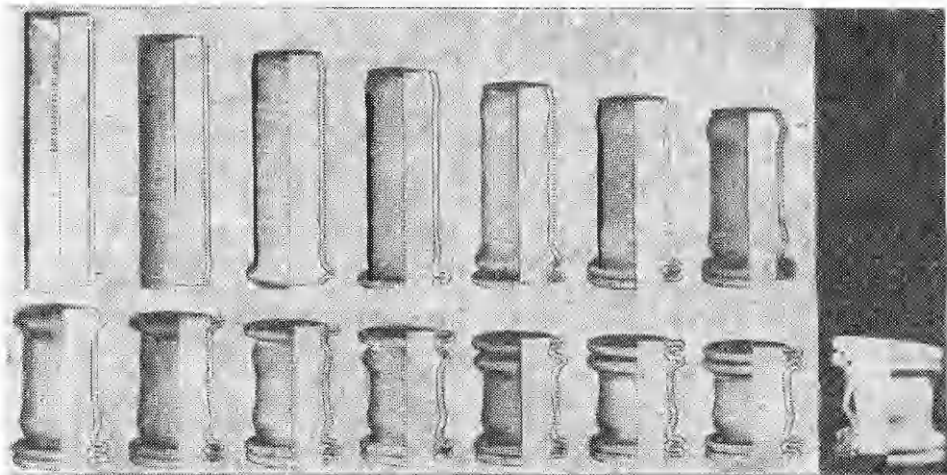
Р и с. 2

протяжении всего процесса осевого сжатия (рис. 3). При этом совпадение зависимостей  $N = N(t)$  для оболочек с наполнителем и без него наблюдается до точки А (рис. 2, кривые *б* и *з*), когда выпучивание в оболочках осесимметричное. Затем выпучивание оболочки без наполнителя переходит в асимметричную форму и зависимости  $N = N(t)$  начинают различаться. В расчетах влияние пористого наполнителя не учитывалось и  $N = N(t)$  соответствовала продольному усилию, реализуемому в оболочке в зоне, прилегающей к формируемым складкам со стороны неподвижной опоры.

На рис. 2 видно хорошее согласие расчетов и экспериментов по зависимости  $N = N(t)$  до достаточно больших величин обжатия оболочки ( $\approx 40\%$ ), при которых данный наполнитель еще не оказывает существенного влияния на продольное усилие, реализуемое в оболочке. Расчетный характер формоизменения цилиндрической оболочки на различные моменты времени (через 100 мкс) для опыта 4 приведен на рис. 3. Сопоставляя рис. 3 с 2, *е* по

времени, можно отметить, что рост  $N = N(t)$  до критической величины наблюдается при прогибах, не превышающих толщину оболочки, а спад — при интенсивном формировании складки.

Сравнение результатов расчета с данными экспериментов показывает достаточное согласие как по остаточной форме оболочки (см. рис. 1, *б*, *в* и рис. 3), так и по зависимости  $N = N(t)$  (см. рис. 2), что говорит о работоспособности предложенной модели при описании ударного сжатия цилиндрических оболочек умеренной толщины ( $h/R = 1/10 \dots 1/5$ ).



Р и с. 3

## ЛИТЕРАТУРА

1. Багрянов Б. В., Квасков Г. А. и др. Исследование осевого динамического сжатия трубчатых металлических крешеров // ПМТФ.— 1982.— № 1.
2. Коипа А. О механизме выпучивания круговой цилиндрической оболочки при продольном ударе // Механика.— 1961.— № 6.
3. Ефимов А. Б., Малый В. И. О механизме выпучивания цилиндрической оболочки при продольном ударе // Теория оболочек и пластин.— М.: Наука, 1973.
4. Баженов В. Г., Ломунов В. К. Экспериментально-теоретическое исследование упругопластического выпучивания цилиндрических оболочек при осевом ударе // ПМ.— 1983.— № 6.
5. Вольмир А. С. Нелинейная динамика пластин и оболочек.— М.: Наука, 1972.
6. Баженов В. Г., Ломунов В. К. Исследование упругопластического выпучивания оболочек вращения при ударном нагружении // Прикл. проблемы прочности и пластичности/Всесоюз. межвуз. сб.— Горький: Горьк. ун-т, 1975.— Вып. 2.
7. Бригадиров Г. В., Ломунов В. К. О двух расчетных схемах ударного выпучивания цилиндрических оболочек // Прикл. проблемы прочности и пластичности/Всесоюз. межвуз. сб.— Горький: Горьк. ун-т, 1984.— Вып. 28.

Поступила 3/II 1987 г.

УДК 539.3

## ПЛАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ РУЛОНИРОВАННЫХ ОБОЛОЧЕК

*С. В. Лавриков, А. Ф. Ревуженко*

*(Новосибирск)*

1. Рассмотренные в данной работе постановки возникли из следующих соображений. Обратимся к классическому решению задачи Ламе для толстостенной цилиндрической трубы. В силу осевой симметрии задачи касательные напряжения отсутствуют:  $\sigma_{r\theta} = 0$  ( $r, \theta$  — полярные координаты). Но это означает, что если в трубе сделать произвольное число разрезов по окружностям  $r = \text{const}$ , то на работе конструкции эти разрезы не отразятся. Следовательно, сечение трубы можно представить набранным из тонких отдельных колец, вплотную вставленных друг в друга; кольца работают так, что условия на контактах между ними на работе всей конструкции не сказываются. Как известно, в такой схеме материал нагружен весьма неравномерно, причем, если внешний радиус трубы превосходит внутренний более чем в 3—4 раза, то дальнейшее увеличение толщины трубы на переход внутренней области в пластическое состояние (разрушение) практически не влияет. Поэтому естественно возникает идея: нельзя ли работу упругих колец организовать таким образом, чтобы между ними мобилизовались силы внешнего трения, которые внесли бы свой вклад в «противоборство» внутреннему давлению. Разрежем кольца по некоторому радиусу и склеим их со сдвигом на один шаг (рис. 1). Полученная конструкция отличается от предыдущей принципиально. Можно ожидать, что за счет проскальзывания слоев удастся включить в работу материал, удаленный от внутренней границы и, следовательно, приложенную нагрузку распределить более равномерно, увеличив тем самым несущую способность конструкции.

2. Пусть имеется упругая оболочка постоянной толщины, свернутая в рулон (рис. 1). Считаем это состояние естественным. Возьмем отдельный элемент среды, включающий некоторое число слоев рулона. Кривизну линий контакта пока не учитываем (рис. 2). Как реагирует этот элемент на внешнее нагружение? Очевидно, что при сжатии в направлениях  $Ox_1, Ox_2$  разрезы никак не проявятся и реакция элемента будет упругой. Пусть теперь приложены касательные напряжения, они вызовут упругий сдвиг слоев материала между разрезами и в общем случае — определенные проскальзывания на контактах. Таким образом,