

является определяющей для скорости, в то время как цепные и изгибные напряжения принимают свои максимальные значения по нулевой форме. Максимальная амплитуда изгибных напряжений быстрее всего достигается при $\theta = \pi/2$, $x = L$ и на 40 % превышает аналитическое значение (2.3). Сравнение расчетов, приведенных при различных L , показало, что изменение длины отсека практически не меняет максимальных амплитуд изгибных напряжений.

Таким образом, основной вклад в напряжения вносит нулевая форма, в радиальную скорость — первая. При $t \geq 6R/c_0$ асимптотика описывает основную часть возмущений, при $t < 6R/c_0$ превышение возмущений над асимптотикой может составлять $\sim 40\%$. В подкрепленной оболочке максимальными являются изгибные осевые напряжения в районе переборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амиро И. Я., Заруцкий В. А. Исследования в области динамики ребристых оболочек // ПМ.— 1981.— Т. 17, № 11.
2. Перцев А. К., Слепнева Л. В. Воздействие ударной волны на круговую цилиндрическую оболочку, подкрепленную ребрами жесткости // Актуальные проблемы механики сплошных сред.— Л., 1980.— (Исследования по упругости и пластичности; вып. 13).
3. Бергланд Д. В. Нестационарное взаимодействие оболочки, подкрепленной гибкими кольцами, с жидкой средой // РТК.— 1972.— Т. 10, № 11.
4. Галиев Ш. У. Напряженное состояние периодически подкрепленного полого цилиндра при действии подводной волны // ДАН УССР. Сер. А.— 1976.— № 4.
5. Пинчукова Н. И. Действие плоской акустической волны давления на цилиндрическую оболочку, заполненную жидкостью // Изв. АН СССР. МТТ.— 1985.— № 6.
6. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки.— М.; Л.: ОГИЗ, 1963.

г. Новосибирск

Поступила 29/III 1991 г.,

в окончательном варианте — 20/VI 1991 г.

УДК 539.374,534.1

А. Г. Иванов, Ю. Д. Лавровский, В. А. Огородников

НЕКОТОРЫЕ СЛУЧАИ РАЗВИТИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СХОДЯЩИХСЯ ОБОЛОЧКАХ

Цилиндрические металлические оболочки (лайнеры), разгоняемые с помощью энергии взрыва до скоростей несколько километров в секунду, часто используются во взрывных генераторах для сжатия дейтериевой плазмы, получения высоких динамических давлений и т. п. [1]. Возбуждение детонации цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ) в таких генераторах осуществляется, как правило, синхронно в некотором количестве точек, расположенных на наружной поверхности заряда, с использованием той или иной системы инициирования. Это приводит к формированию возмущенного детонационного фронта, выходящего на разгоняемые цилиндрические оболочки, что в свою очередь обуславливает наличие изначально заданных возмущений на их внутренней поверхности [2]. Возникают вопросы о поведении таких возмущений в процессе схождения оболочки к центру, в том числе связанные с влиянием физико-механических характеристик материала оболочки.

Существующие линейные теории рассматриваемого явления дают решения, из которых следует вывод о колебательном характере поведения возмущений на внутренней границе сходящейся оболочки [3]. Однако они основываются на ряде упрощающих предположений, которые, как правило, для многих представляющих практический интерес случаев не выполняются. Так, для сравнительно тонкостенных оболочек, разгоняемых с помощью энергии взрыва, их применение более чем дискус-

сионно, и такие задачи сегодня можно решать, по-видимому, только численно. Этот подход использован, например, для описания развития специально заданных возмущений на наружной или внутренней границах сферической сходящейся оболочки с учетом и без учета прочности ее материала [4].

В данной работе методом импульсной рентгенографии исследовано поведение возмущений на внутренней границе сходящихся цилиндрических оболочек, разгоняемых энергией взрыва. Схема разреза экспериментального устройства приведена на рис. 1. Возбуждение детонации на наружной поверхности цилиндрического заряда ВВ, имеющего плотность $\rho_0 = 1,72 \text{ г/см}^3$ и скорость детонации $D = 8,15 \text{ км/с}$, осуществлялось в точках, расположенных по вершинам квадратов со стороной 22 мм, что соответствует расположению 42 точек в окружном направлении. Во всех опытах использовались наружные оболочки из алюминиевого сплава В95 и стали Ст. 3, а нижняя оболочка, возмущения на внутренней поверхности которой исследовались, выполнялась из стали Ст.3 или свинца С1. Использование этих материалов с заметно отличающимися физико-механическими характеристиками предусмотрено для того, чтобы выявить влияние прочности материала оболочки на развитие возмущений.

Рентгенографирование формы внутренней границы оболочки (ВГО) в опытах осуществлялось на моменты времени, отвечающие ее сходимости к радиусу: $0,5 R_+$, $0,3 R_+$, $0,2 R_+$, $0,1 R_+$ и $\sim 0,07 R_+$ (R_+ — наружный радиус заряда ВВ).

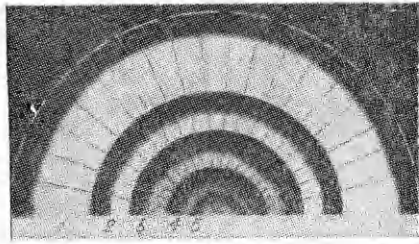
Для контроля отсутствия влияния торцевой разгрузки на форму сходящейся оболочки в осевом направлении проведен специальный опыт, в котором рентгенографирование осуществлялось в направлении, перпендикулярном оси оболочки. Было показано, что при сходимости ВГО к радиусу $0,1 R_+$ длина неразгруженного участка оболочки составляла 100 мм, что вполне достаточно для получения объективной информации об исследуемом явлении. На рис. 2, 3 приведен монтаж фотографий с рентгенограмм опытов для оболочек из стали и свинца соответственно (штриховые линии — начальное положение ВГО, а радиальные штрихпунктирные — направления проекций точек возбуждения детонации с наружной поверхности заряда ВВ к центру симметрии оболочек, цифры внизу — номера опытов). Результаты обработки рентгенограмм опытов приведены в таблице, где t — время от начала движения ВГО до момента рентгенографирования t_i , $r_i = R_i/R_+$ — относительный радиус ВГО на момент t_i , a — амплитуда возмущений, δ , λ — толщина оболочки и длина волны возмущений на текущем радиусе ВГО R_i .

Анализ результатов опытов с оболочками из стали и свинца показывает, что опережающие возмущения на ВГО в обоих случаях формируются под проекциями точек возбуждения детонации в заряде ВВ на стадии разгона оболочек продуктами взрыва (ПВ)*. На этой же стадии движения оболочек рост возмущений по амплитуде практически прекращается. На инерционном участке движения оболочек ($r_i \leq 0,3 R_+$) амплитуда возмущений сохраняется для оболочки из стали до радиуса

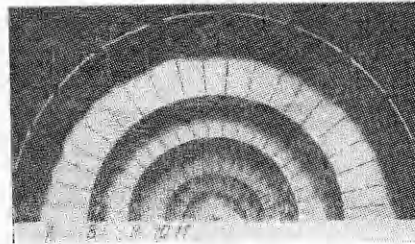
Рис. 1. Схема разреза экспериментального устройства. На рисунке показан разрез сходящейся цилиндрической оболочки. Радиус оболочки обозначен как $R, \text{ мм}$. На вертикальной оси отложены значения радиусов: 150, 99,0, 100, 92,8, 95,5, 91,4 (или 91,7). В нижней части рисунка обозначены материалы: Fe (или Pb) FeAl и ВВ . Стрелки указывают на направление движения или возмущения.

Р и с. 1

* Отметим, что в случае разгона однослойных пластин и оболочек эти возмущения формируются в четверных точках (центр квадрата, образуемого четырьмя соседними точками возбуждения детонации в заряде ВВ) [2].



Р и с. 2



Р и с. 3

$\sim 0,2 R_+$, а для оболочки из свинца до радиуса $\sim 0,1 R_+$ и выполняется приближенное соотношение $a \simeq \text{const}$. Для оболочки из стали на радиусе $r_i \leq 0,2 R_+$ за счет стягивания ее поверхности возмущения практически сливаются, образуя область пониженной плотности впереди основной части сходящейся оболочки толщиной $\sim a$. Для оболочки из свинца этого не наблюдается за счет струйной природы возмущений. На радиусе $r_i \leq 0,08 R_+$ начинается процесс взаимодействия струй и отдельные частицы материала достигают центра симметрии оболочки. Следует отметить, что в процессе схождения оболочек из стали и свинца как на участке их разгона ПВ, так и на инерционном участке движения знак возмущений сохраняется, т. е. колебательный характер их поведения не наблюдается. Это обстоятельство является экспериментальным подтверждением справедливости утверждения о некорректности использования линейной теории к исследуемому типу движения.

Физико-механические свойства материала оболочки оказывают заметное влияние на форму и амплитуду возмущений. Так, если для оболочки из более прочной стали возмущения имеют вид правильных выпуклостей, близких к синусоидальной форме, то форма возмущений на оболочке из свинца, практически не обладающего прочностью из-за плавления на ударной волне, трансформируется: выпуклости вытягиваются в струи, указывая на явную нелинейность процесса. Кроме того, амплитуда возмущений у оболочек из стали в 1,5 раза меньше, чем у оболочек из свинца.

Оценки градиентов скоростей между областями оболочки, расположенными в зоне возмущений и между ними, по результатам опытов на участке разгона оболочек ПВ ($r_i = 0,5-0,3 R_+$) дают значения ускорений возмущенных областей относительно невозмущенных $dW/dt = 1,4 \times 10^9 \text{ см/с}^2$ для оболочки из стали и $1,1 \cdot 10^9 \text{ см/с}^2$ из свинца или значения инерционных сил $\sigma_F = \rho_0 \delta dW/dt$, равных 0,22 и 0,19 ГПа соответственно. Значения динамического предела текучести материала оболочки в этих условиях их деформирования ($\dot{\epsilon} = W/R = 10^4 - 10^5 \text{ 1/с}$) составляют $\sigma_s = 1 \text{ ГПа}$ для стали [5] и 0,06 ГПа для свинца [6]. Сравнение показывает, что для стали $\sigma_s > \sigma_F$, поэтому сдвиговая прочность материала оболочки оказывает стабилизирующее влияние на форму и амплитуду возмущений. Для свинцовой оболочки $\sigma_s < \sigma_F$. В этом случае сдвиговая

Материал оболочки	Номер опыта	t , мкс	r_i	a	δ	λ
				мм		
Сталь	1	6,15	0,53	1—2	1,6	12
	2	17,90	0,32	3—4	2,6	7
	3	23,80	0,21	3—4	3,9	5
	4	26,00	0,11	—	6,5	—
	5	28,10	0,06	—	9,4	—
Свинец	7	6,23	0,49	3—4	1,2	12
	8	17,90	0,30	5—6	1,9	7
	9	23,18	0,20	5—6	2,9	5
	10	27,30	0,09	5—6	5,4	3
	11	28,05	0,08	5—7	5,8	3

прочность материала не оказывает стабилизирующего влияния на развитие возмущений, которые хотя и имеют в начальной стадии движения оболочки ту же форму, что и у стальной оболочки, но из-за преобладающего влияния инерционных сил трансформируются в струи. Отметим, что результаты численных расчетов [4], несмотря на другой вид детерминированных возмущений, качественно не противоречат полученным экспериментальным данным по влиянию прочности материала оболочки на поведение возмущений у ВГО при ее схождении к центру симметрии.

Таким образом, установлено, что при разгоне сравнительно тонких многослойных цилиндрических оболочек с помощью энергии взрыва при наличии детерминированных возмущений на внутренней границе нижней сходящейся оболочки поведение последних не описывается упрощенной линейной теорией. В частности, отсутствует колебательный характер развития возмущений. Сдвиговая прочность материала оболочки оказывает существенное стабилизирующее действие на развитие возмущений. Полученные результаты могут быть использованы для отработки двумерных программ численного счета рассмотренного типа движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерентович Г. Сильное сжатие вещества при помощи кумуляции энергии взрывчатого вещества // ПМТФ.— 1989.— № 1.
2. Огородников В. А., Иванов А. Г. Особенности откольного разрушения пластин при синхронном инициировании заряда ВВ в нескольких точках // ФГВ.— 1984.— № 3.
3. Овсянников Л. В. Общие уравнения и примеры // Задача о неустановившемся движении жидкости со свободной границей.— Новосибирск: Наука, 1967.
4. Elliott L. A. Calculation of the growth of interface instabilities by a lagrangian mesh method // 4th Symp. (Intern.) on detonation, White Oak, USA, Oct. 1965: Proc.— Wash., 1967.
5. Борисевич В. К., Сабелькин В. П., Солодянкин С. Н. и др. Динамические характеристики некоторых металлов и сплавов // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. ст./Харьк. авиац. ин-т.— 1981.— Вып. 9.
6. Malatynski M., Klepaczko J. Experimental investigation of plastic properties of lead over a wide range of strain rates // Intern. J. Mech. Sci.— 1980.— V. 22, N 3.

г. Арзамас

Поступила 18/VI 1991 г.,
в окончательном варианте — 16/VIII 1991 г.

УДК 539.3 : 534.1

В. В. Новиков, Ш. М. Хасанов

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ

В слабонелинейной постановке задачи уравнения цилиндрической оболочки [1] для осесимметричного случая приводятся к уравнениям в нормальных переменных, с помощью которых выводится нелинейное уравнение Шредингера для изгибных волн, на его основе рассматривается вопрос о модуляционной неустойчивости волн. Определена область значений волновых чисел, в которой стационарная структура нелинейной волны может быть разрушена за счет эффектов распадной неустойчивости.

Нелинейные уравнения (при учете только геометрической нелинейности) цилиндрической оболочки для осесимметричного случая в предположении, что длина волны много больше толщины оболочки, имеют вид

$$(1) \quad c^{-2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + i \tilde{\mu} \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2;$$