

## **Исследование процесса потери устойчивости гладких тонкостенных цилиндрических оболочек при локальном действии импульса излучения**

**А. И. Костоглотов, В. В. Бендюков, В. В. Дерюшев, Л. А. Шевцова**

Ростовский военный институт, Ростов-на-Дону, Россия

*Показано, что воздействие кратковременного импульса внешнего давления вследствие излучения лазера приводит к упругому деформированию оболочки во время действия импульса по коротковолновой форме на границе области нагружения. После окончания действия импульса оболочка продолжает движение по неосесимметричной форме. По достижении предельных перемещений происходит общая потеря устойчивости. Форма волнообразования общей потери устойчивости в окружном направлении определяется размером области нагружения.*

**Ключевые слова:** кратковременный импульс, давление, лазер, область нагружения, упругое деформирование.

В настоящее время известно большое количество экспериментальных работ, посвященных исследованию динамической устойчивости тонкостенных оболочек при кратковременных нагрузках. Чаще всего при постановке таких экспериментов рассматривались всестороннее [1], боковое [2] и в редких случаях локальное воздействие импульса по поверхности конструкции с комбинацией статических нагрузок (осевое сжатие [3] и внутреннее давление [4]). При этом импульс давления создавался различными способами [2], в том числе и излучением лазера [5]. Длительность нагрузки варьировалась от единиц микросекунд до нескольких миллисекунд. Коротковолновая форма потери устойчивости характеризуется образованием множества регулярно расположенных вмятин, аппроксимируемых выражением  $w = f \cos n\varphi$ , где  $f$  – амплитуда прогиба;  $\varphi$  – угловая координата;  $n \gg 1$ . Длина волны выпучивания по окружности  $l_y$  в несколько раз меньше радиуса  $R$  [2] и определяется по остаточному деформированию после воздействия. Однако не всегда по остаточному прогибу можно получить реальную картину деформирования оболочки в процессе воздействия динамической нагрузки, что важно при оценке несущей способности тонкостенных конструкций.

Экспериментальные данные о форме локальной потери устойчивости оболочек в момент и после воздействия кратковременной нагрузки практически отсутствуют. Это обусловлено значительными трудностями, связанными с необходимостью использования специальных методов для создания таких нагрузок и регистрации форм деформирования оболочек в процессе их воздействия.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования процесса выпучивания гладких цилиндрических оболочек при локализованном действии кратковременного импульса внешнего давления, создаваемого излучением лазера.

**Методика эксперимента.** Для визуальной регистрации процесса потери устойчивости с помощью скоростной кинокамеры в качестве объекта испытаний были выбраны цилиндрические оболочки из алюминиевой фольги толщиной  $h = 0,03$  мм с геометрическими параметрами  $R/h = 1160$ ;  $L/R = 3$ , что позволяло получать большие прогибы ( $f \ll h$ ) при ограниченных энергетических параметрах лазера и достаточно точно регистрировать потерю динамической устойчивости при расшифровке кинограммы процесса деформирования. Локальная динамическая нагрузка создавалась излучением оптического квантового генератора ГОС-1001 с пассивным модулятором добротности на химических красителях. Длина волны излучения  $\lambda$  составляла 1,06 мкм.

Оболочки изготавливали из листовых заготовок с клеевым швом встык через накладку в месте стыка. В торцах оболочки устанавливали жесткие днища, с помощью которых испытуемые образцы закрепляли в специальном устройстве, позволяющем изменять ее вертикальное положение по отношению к оси распределения излучения источника. В эксперименте угол падения излучения  $\varphi$  варьировался от 0 до  $70^\circ$ .

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Исследуемая оболочка 1, закрепленная в устройстве 2, располагается на расстоянии 610 мм от излучателя 3, что позволяет с помощью линзы 4 с фокусным расстоянием  $F = 1000$  мм на поверхности оболочки получить круговую область нагружения диаметром  $d = 18-20$  мм. Форма и длительность импульса излучения регистрируются коаксиальным фотоэлементом типа ФК15 5, на который излучение попадает от оптического клина 6, и отображается на экране электронно-лучевой трубки прибора типа БЛОР-04 7. Энергия импульсов излучения измеряется преобразователем энергии типа ТПИ-2М 8 и регистрируется с помощью микровольтнаноамперметра типа Ф-111 9. Величина энергии генерируемого импульса излучения колеблется от 17,5 до 20 Дж, длительность импульса излучения по полувысоте амплитуды (по уровню 0,5)  $\tau = 60...70$  нс.

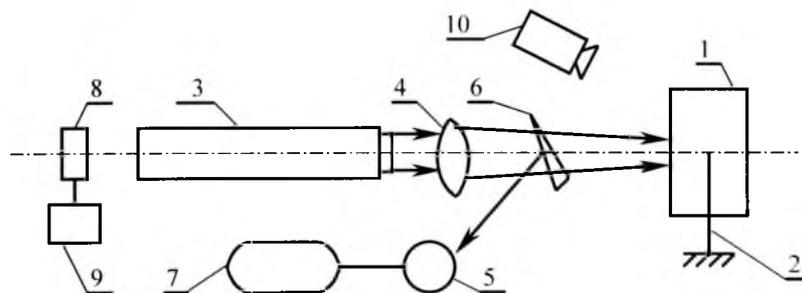


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

На рис. 2 приведена характерная осциллограмма импульса излучения. Процесс деформирования оболочек в ходе потери динамической устойчивости регистрируется скоростной кинокамерой типа СКС-1М 10 (рис. 1). Скорость киносъемки составляет 26000 кадр/с, что позволяет получить задержку между кадрами 18,345 мкс.

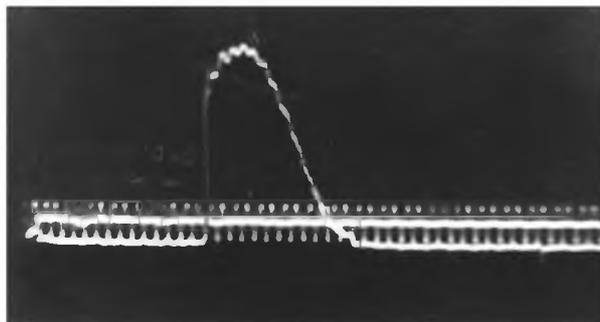


Рис. 2. Характерная форма импульса излучения (развертка 5 нс/дел).

**Результаты и их обсуждение.** Для определения результата действия лазерного излучения генератора ГОС-1001 на испытуемые модели определяется критерий Фурье  $F_0$ , представляющий собой безразмерное время нагрева [6]:

$$F_0 = \frac{a\tau}{h^2},$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности материала, равный для алюминия  $0,83 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Поскольку в исследуемом диапазоне длительностей импульса излучения  $F_0 = 6,5 \cdot 10^{-3}$ , результатом воздействия будет импульсный удар – импульс давления высокой амплитуды и короткой длительности, действие которого подробно изучено в [5]. Величина импульса давления при угле падения излучения  $\varphi = 0$  по данным работы [7] при тех же условиях облучения, что и в рассматриваемой работе, равна  $I = 1,4 \text{ Па} \cdot \text{с}$ . При этом амплитуда давления  $P_{\text{max}}$  при  $\varphi = 0$  может достигать  $2 \cdot 10^7 \text{ Па}$ . Давление на поверхности оболочки при разных углах падения излучения можно определить по зависимости [7]

$$P(\varphi) = \frac{I \cos \varphi}{\tau S_0},$$

где  $S_0$  – площадь облучаемой поверхности при  $\varphi = 0$ .

Во всех исследуемых случаях при высокоскоростном нагружении оболочек локализованным импульсом внешнего давления, возникающим при взаимодействии излучения с поверхностью мишени, появилась система густо расположенных вдоль окружности гребневидных вмятин, вытянутых по образующей оболочки на всю область нагружения. В результате расшифровки скоростной киносъемки обнаружено, что коротковолновая форма потери устойчивости (рис. 3) образуется в момент воздействия импульса давления (примерно на 20...30-й мкс после начала), а затем происходит общая потеря устойчивости.

Трансформацию формы деформированной поверхности оболочки во времени иллюстрирует рис. 4, где точками показаны экспериментальные значения максимальных размеров появившейся вмятины вдоль образующей,

сплошной линией – осредненные значения области потери устойчивости при рабочей длине оболочки 110 мм. В области нагружения образовывалось  $n \sim 11-12$  волн по окружности и  $m \sim 2-3$  полуволны в продольном направлении. Налагая на оболочку условие периодичности волнообразования, можно определить форму волнообразования при коротковолновой неустойчивости, которая в рассматриваемом случае будет следующей:  $n \sim 120-140$ ,  $m \sim 12-18$ . После деформирования по указанной форме оболочка продолжает движение внутрь по неосесимметричной форме ( $n = 11-12$ ,  $m = 1$ ). Из рис. 4, иллюстрирующего изменение размеров области потери устойчивости с течением времени можно определить период колебаний оболочки, который для исследуемой оболочки при приведенных выше параметрах импульса излучения равен приблизительно 1,2 мс. Эти экспериментальные результаты достаточно точно совпадают с теоретическими расчетами для частоты и периода собственных колебаний оболочки [8]. Теоретическое значение периода колебаний оболочки при  $n = 12$  и  $m = 1$  равно 1,317 мс, что дает относительную ошибку измерения менее 9%.



Рис. 3. Форма потери коротковолновой устойчивости оболочки в локальной области во время воздействия импульса давления.

Аналогичная неосесимметричная картина выпучивания оболочки наблюдалась для оболочки с параметром толщины  $R/h = 333$  при более низкой скорости нагружения [3]. Эти обстоятельства позволяют предположить, что при теоретической оценке динамических прогибов оболочки в случае локального кратковременного воздействия импульса внешнего давления вначале следует рассматривать область, ограниченную пространственным распределением импульса, в которой в зависимости от скорости нагружения и амплитуды давления количество волн в окружном направлении может на порядок и более превышать количество волн статической потери устойчивости [3]. После потери устойчивости оболочки в области воздействия импульса дальнейший характер деформирования очевиден – обечайка выпучивается внутрь с числом полуволн вдоль оси, равным единице, что типично для оболочек средней длины, и числом волн в окружном направлении, не превышающим отношения длины оболочки по окружности к диаметру области воздействия импульса давления. Такие формы выпучивания оболочки характерны для нагружения внешним динамическим давлением, равномерно распределенным по боковой поверхности оболочки, и теоретически описываются методиками, представленными, например, в [2, 8].

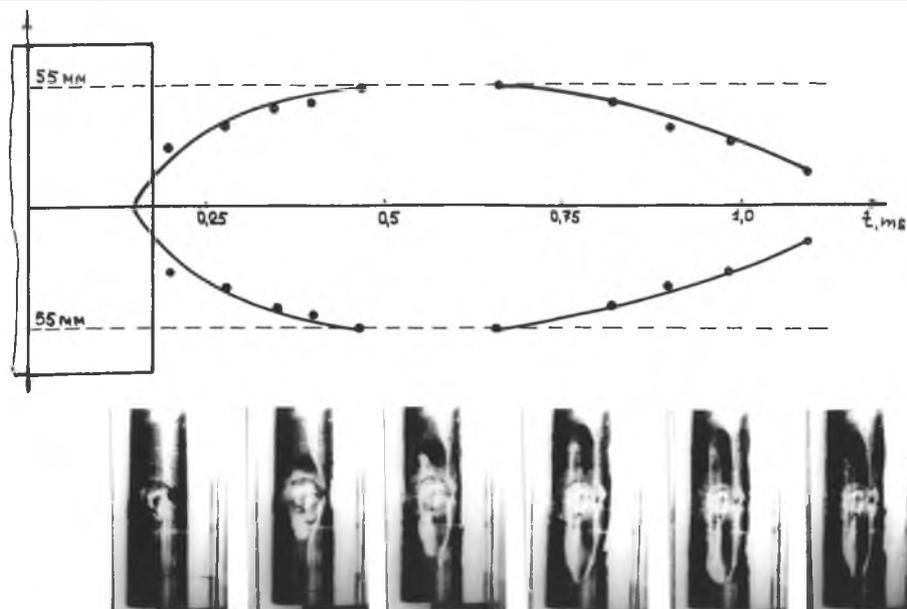


Рис. 4. Трансформация формы потери динамической устойчивости оболочки во времени.

С увеличением угла падения излучения  $\varphi > 25^\circ$  симметрия расположения центрального пятна по длине оболочки нарушалась – область потери устойчивости вытягивалась вдоль меридиана. При этом геометрические размеры эллиптического пятна общей потери устойчивости оставались примерно одинаковыми. Картина деформирования оболочки в области, ограниченной пятном облучения, изменялась: количество волн в окружном направлении существенно уменьшилось, а вдоль меридиана оно осталось примерно таким же. Например, при  $\varphi = 30^\circ$  в области нагружения форма волнообразования следующая:  $m = 3$ ;  $n = 5-6$ . При  $\varphi > 60^\circ$  динамической потери устойчивости в пределах области нагружения оболочки не происходило. Очевидно, это связано, с одной стороны, с увеличением площади облучаемой поверхности, что приводит к уменьшению плотности мощности воздействующего излучения  $q$ , с другой – довольно значительным влиянием на импульс давления роста отражательной способности мишени в диапазоне  $\varphi = 45...60^\circ$ . Все это приводит к существенному и резкому уменьшению амплитуды давления [7, 9]. Ранее [9] показано, что при изменении коэффициента отражения  $R_{отр}$  на 30...40% величина импульса отдачи может увеличиться (уменьшиться) в 2...2,5 раза. Еще весомее вклад коэффициента отражения в импульс отдачи при изменении угла падения излучения. В некоторых случаях импульс отдачи может измениться на порядок. Поэтому сравнение данных различных экспериментов без привязки к конкретному  $R_{отр}$  – довольно затруднительно.

## Выводы

1. Воздействие кратковременного импульса внешнего давления приводит к деформированию оболочки по коротковолновой форме в пределах

области нагружения практически во время действия импульса. Форма волнообразования в месте воздействия определяется амплитудой импульса давления, причем рост амплитуды приводит к увеличению волн в окружном направлении.

2. После потери устойчивости в локальной области оболочка продолжает движение по неосесимметричной форме, и по достижении предельных перемещений, вызывающих пластическую деформацию, происходит общая потеря устойчивости. Размеры центрального эллиптического пятна, характерного для потери устойчивости при боковом внешнем динамическом давлении, определяются диаметром области нагружения вдоль окружности и одной полуволной вдоль образующей оболочки.

3. С уменьшением угла падения излучения нарушается симметрия расположения центрального локального пятна и наблюдается тенденция к существенному уменьшению количества волн в окружном направлении. При углах падения, превышающих  $60^\circ$ , локальной потери устойчивости не зарегистрировано, что, вероятно, объясняется резким ростом коэффициента отражения мипени.

## Резюме

Показано, що під час дії короткочасного імпульсу зовнішнього тиску від випромінювання лазера має місце пружне деформування оболонки під час його дії за короткохвильовою формою в межах області навантаження. Після закінчення дії імпульсу оболонка продовжує рухатися по невісесиметричній формі. По досягненні граничних переміщень відбувається загальна втрата стійкості. Форма хвилеутворення загальної втрати стійкості в обводовому напрямку визначається розміром області навантаження.

1. *Королев В. П.* Устойчивость цилиндрических оболочек при динамическом внешнем давлении // Прикл. механика. – 1977. – 8, № 1. – С. 116 – 119.
2. *Кармишин А. В., Жуков А. И., Колосов В. Т. и др.* Методы динамических расчетов и испытаний тонкостенных конструкций / Под ред. А. В. Кармишина. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
3. *Бендюков В. В., Дерюшев В. В.* Динамическая коротковолновая неустойчивость цилиндрических оболочек при локальном действии импульса внешнего давления // Пробл. прочности. – 1995. – № 4. – С. 36 – 43.
4. *Баскаков В. Н., Костоглотов А. И., Шевцова Л. А.* Исследование динамической устойчивости гладких цилиндрических оболочек // Там же. – 1982. – № 5. – С. 31 – 33.
5. *Лоборев В. М., Острик А. В., Петровский В. П., Чепрунов А. А.* Методы моделирования механического действия излучений на материалы и конструкции. – Сергиев Посад: ЦФТИ МОРФ, 1997. – 75 с.
6. *Исхаков Г. В., Журавлев А. Е.* Прочность армированных пластиков и металлов. – М.: Машиностроение, 1981. – 234 с.

7. *Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В.* Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
8. *Костоготов А. И., Баскаков В. Н., Шевцова Л. А.* Возбуждение параметрических колебаний цилиндрической оболочки импульсами внешнего давления // Прикл. механика. – 1983. – **22**, № 3. – С. 103 – 108.
9. *Walter W. T.* Reflections changes of metals during laser irradiation // Laser Application in Materials Processing. – 1979. – **198**. – P. 1099 – 1117.

Поступила 28. 03. 2003