

УДК 539.3

## РЕАКЦИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

© 2011 г.

Л.В. Володина

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, Саров

postmaster@ifv.vniief.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Представлены результаты экспериментально-расчетного исследования особенностей динамики полусферических оболочек из полимерных и композитных материалов при импульсном (взрывном) нагружении. В процессе упругих колебаний оболочек со свободным краем, наряду с модами, согласующимися с аналитическим решением задачи о колебаниях вязкоупругой полусферической оболочки, полученным в рамках моментной теории тонких оболочек Кирхгофа – Лява, возбуждаются непрогнозируемые низкочастотные колебания. Для «аномальных» колебаний характерно увеличение частоты при возрастании толщины оболочек и синусоидальное распределение амплитуды деформации по азимуту. Результаты экспериментов дают основания сопоставить процесс низкочастотных колебаний в вязкоупругих полусферических оболочках с распространением симметричных волн Лэмба в пластинах.

*Ключевые слова:* вязкоупругая полусферическая оболочка, взрывное нагружение, деформация, частотный спектр колебаний, волны Лэмба.

Разработана методика исследования динамических вязкоупругих свойств конструкционных материалов, основанная на анализе свободных затухающих колебаний полусферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении. Схематически постановка эксперимента представлена на рис. 1.

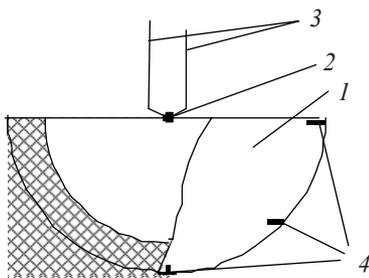


Рис. 1

В центре экваториальной плоскости 1 устанавливается сферическая ампула 2 с жидким взрывчатым веществом (ЖВВ) [1]. Применение ЖВВ, во-первых, обеспечивает равномерное нагружение внутренней поверхности оболочки, во-вторых, благодаря возможности инициирования электроискровым разрядом с помощью электродов 3 очень малых масс ЖВВ (~0.05 г), позволяет варьировать амплитуду нагружающего импульса давления, не выходя за рамки упругих деформаций. В опытах регистрируются круговые дефор-

мации поверхности оболочки  $\epsilon_\varphi(t)$  с помощью тензорезисторов 4, наклеенных при различных значениях координат  $\theta$  и  $\varphi$  ( $\theta$  – полярное расстояние,  $\varphi$  – азимут).

Для интерпретации результатов решена задача о колебаниях вязкоупругой полусферической оболочки со свободным краем на основе моментной теории тонких оболочек Кирхгофа – Лява в осесимметричной постановке. Предполагалось, что материал оболочки ведет себя как вязкоупругая среда Кельвина – Фойгта. На основе сопоставления экспериментального и расчетного спектров колебаний определяются наиболее вероятные значения вязкоупругих характеристик.

При исследовании материалов со слабыми демпфирующими свойствами, в частности металлов и сплавов, экспериментальные результаты укладываются в рамки полученного решения. При испытаниях оболочек из полимеров и композитов, в том числе композитных ВВ, в ряде опытов возбуждались непрогнозируемые низкочастотные колебания [2]. Первоначально это явление связывали с изменением фазового состояния материала оболочки вследствие рассеяния упругой энергии [3]. Продолжение исследований показало несостоятельность этого предположения.

С целью изучения природы «аномальных» низкочастотных колебаний была проведена серия опытов с капролоновыми полусферами, которые

имели одинаковые значения радиуса срединной поверхности, но отличались по толщине (радиус срединной поверхности  $R = 49$  мм, толщина  $h = 4, 6, 8$  мм). На рис. 2 приведены зависимости кольцевой деформации от времени, зарегистрированные датчиками, располагавшимися один напротив другого на внутренней и наружной поверхности оболочек.

Отличительной особенностью этих опытов было расположение тензорезисторов. Они наклеивались по радиусу в экваториальной плоскости с равномерным смещением по углу  $\varphi$ . Зависимости радиальной деформации от времени практически представляли собой затухающие синусоиды, частота линейно возрастала с увеличением толщины оболочек. Построено мгновенное

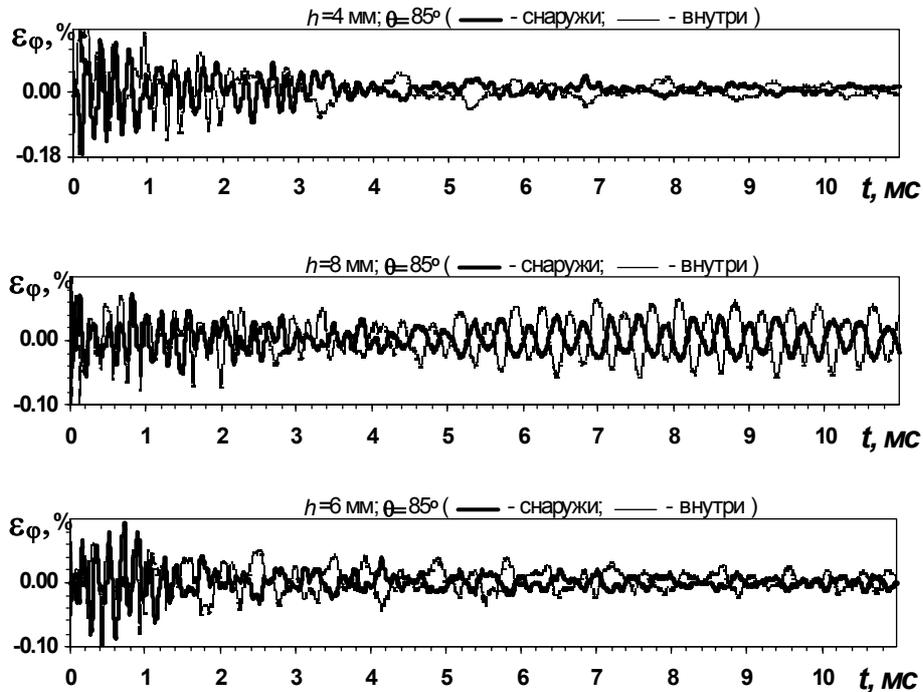


Рис. 2

Высокочастотные осесимметричные колебания во всех случаях происходят синфазно, а «аномальные» низкочастотные – в противофазе, т.е. растяжению снаружи соответствует сжатие внутри и наоборот. «Аномальные» колебания, зарегистрированные со смещением по координате  $\varphi$  на  $\pi/2$  относительно условного нулевого меридиана, тоже происходят в противофазе, т.е. если при  $\varphi = 0$  наблюдается расширение, то при  $\varphi = \pi/2$  – сжатие. В спектрах представленных здесь зависимостей содержится по три низкочастотные моды, причем значения соответствующих частот практически линейно возрастают с увеличением толщины оболочек. Спектральная плотность низкочастотных мод минимальна в полюсе и монотонно увеличивается по мере приближения к свободному краю.

Подобные результаты были получены при испытаниях полусферических оболочек из инертного состава, являющегося имитатором физико-механических свойств композитного ВВ. Также испытывались три полусферы разной толщины с одинаковым значением радиуса срединной по-

распределение амплитуды радиальной деформации по углу  $\varphi$ , которое представляет собой синусоиду, содержащую четыре полуволны.

Анализ результатов проведенного исследования дает основания сопоставить «аномальные» колебания полусферических оболочек с распространением нормальных симметричных волн Лэмба в пластинах. По-видимому, зарегистрированные низкочастотные колебания можно рассматривать как результат суперпозиции стоячих и бегущих волн с пространственным периодом  $\pi R$ .

#### Список литературы

1. Зотов Е.В., Гердюков Н.Н., Володина Л.В. Миниатюрное сферическое взрывное нагружающее устройство // ФГВ. 1996. Т. 32, №2. С. 134–140.
2. Володина Л.В. и др. Особенности динамики вязкоупругих полусферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении // Вестник ННГУ. Серия Механика. 2000. Вып. 2. С. 103–108.
3. Володина Л.В. и др. Динамический переход стеклообразных полимеров в высокоэластическое состояние // Хим. физика. 1999. Т. 18, №10. С. 48–51.

**RESPONSE OF VISCOELASTIC HEMISPHERICAL SHELLS TO PULSE LOADING***L.V. Volodina*

The results of experimental and numerical studies of the peculiarities of dynamics of hemispherical shells made of polymer materials and composites under pulsed (explosive) loading are considered. Unpredictable low-frequency oscillations are excited during the process of elastic vibrations of shells having a free edge, along with modes conforming to an analytical solution of the problem of vibrations of a viscoelastic hemispherical shell. The problem was solved within the framework of general theory of thin shells of Kirchhoff – Love. «Anomalous» oscillations are characterized by sinusoidal azimuth distribution of the strain amplitude and by a rise in frequency when increasing the shell thickness. The results of the experiments make it possible to correlate a process of low-frequency oscillations in viscoelastic hemispherical shells with the propagation of symmetrical Lamb waves in plates.

*Keywords:* viscoelastic hemispherical shell, explosive loading, strain, frequency oscillation spectrum, Lamb wave.