

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ НА НЕПЕРИОДИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

© 2011 г.

В.Н. Зайцев

Московский авиационный институт (государственный технический университет)

vnzaitsev@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Рассматривается композитная оболочка с герметичным слоем под действием статической и динамической нагрузки. Оболочка представляла собой цилиндрическую обечайку с эллиптическими днищами. Определялось ее напряженное и деформированное состояние при статическом и динамическом нагружении. Оценивалось влияние герметичного слоя и композитных слоев на напряженное состояние оболочки. Проведена оценка динамического нагружения на напряженное состояние.

Ключевые слова: композитная оболочка, слоистая конструкция, внутреннее давление, напряжения, перемещения, метод конечных элементов.

1. Соотношения упругости для слоистых оболочек

Уравнения общей теории оболочек включают в себя геометрические соотношения и уравнения равновесия, которые не зависят от свойств материала, а также соотношения упругости, которые должны быть записаны с учетом ортотропии и слоистого характера материала. Пусть оболочка образована из n ортотропных слоев. В случае произвольного расположения слоев по толщине срединная поверхность утрачивает свои преимущества, поэтому будем отсчитывать нормальную координату γ от внутренней поверхности оболочки, которую назовем начальной поверхностью. Обозначим через δ_i расстояние от начальной поверхности до наружной поверхности i -го слоя, причем $\delta_0 = 0$. Тогда для i -го слоя, в пределах которого свойства материала будем считать неизменяющимися, координата γ изменяется в пределах $\delta_{i-1} \leq \gamma \leq \delta_i$. Будем считать слои ортотропными, тогда физические соотношения для i -го слоя могут быть получены путем подстановки компонент деформаций в формулы закона Гука, а найденных напряжений – в соотношения равновесия. Окончательно получим:

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha^i &= B_{11}^i \varepsilon_\alpha^i + B_{12}^i \varepsilon_\beta^i, \\ \sigma_\beta^i &= B_{21}^i \varepsilon_\alpha^i + B_{22}^i \varepsilon_\beta^i, \\ \tau_{\alpha\beta}^i &= B_{33}^i \gamma_{\alpha\beta}^i, \end{aligned} \quad (1.1)$$

коэффициенты B_{mn}^i приведены в [1].

В соответствии с гипотезами Кирхгофа, деформации распределяются по толщине оболочки

по линейному закону. В частности, для i -го слоя имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha^i &= \varepsilon_\alpha^0 + \gamma_i \kappa_\alpha, \quad \varepsilon_\beta^i = \varepsilon_\beta^0 + \gamma_i \kappa_\beta, \\ \gamma_{\alpha\beta}^i &= \gamma_{\alpha\beta}^0 + \gamma_i \kappa_{\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Здесь $\varepsilon_\alpha^0, \varepsilon_\beta^0, \gamma_{\alpha\beta}^0$ и $\kappa_\alpha^0, \kappa_\beta^0, \kappa_{\alpha\beta}^0$ – компоненты деформаций и изменения характеристик кривизны начальной поверхности.

Согласно общей схеме решения задачи в перемещениях, система уравнений теории оболочек может быть сведена к трем уравнениям относительно перемещений [1]:

$$\begin{aligned} L_{1u}u + L_{1v}v + L_{1w}w &= q_\alpha, \\ L_{2u}u + L_{2v}v + L_{2w}w &= q_\beta, \\ L_{3u}u + L_{3v}v + L_{3w}w &= q_\gamma. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Решение приведенной системы уравнений возможно только в ряде частных случаев, а именно, для цилиндрической оболочки при определенных краевых условиях, для сферической оболочки. Известны решения для пологих оболочек двойной кривизны. Остальные аналитические решения относятся к полубезмоментным и безмоментным теориям оболочек. Для оболочек с переменным радиусом кривизны используются численные методы решения. Одним из таких методов является метод конечных элементов [2].

2. Описание конструкции и ее модель

Исследуется напряженное состояние и динамическая реакция композитной оболочки с герметичным слоем. Оболочка представляет собой

цилиндрическую обечайку диаметром $D = 3.9$ м и длиной $l = 1.73$ м с эллиптическими днищами (рис. 1). Одна полуось эллипса равна радиусу цилиндрической части бака, а другая полуось равна 1.3 м. Объем бака равен объему цилиндрической части и объему эллипсоида $V_0 = 41.3$ м³. Оболочка изготовлена из композитного материала с герметичным алюминиевым слоем. Композитная оболочка получается путем намотки ленты толщиной 0.8 мм в четыре слоя под углом $\pm 30^\circ$. Оболочка нагружалась внутренним давлением и продольной перегрузкой. Кроме этого, прикладывалась переменная во времени перегрузка, как функция Хевисайда.

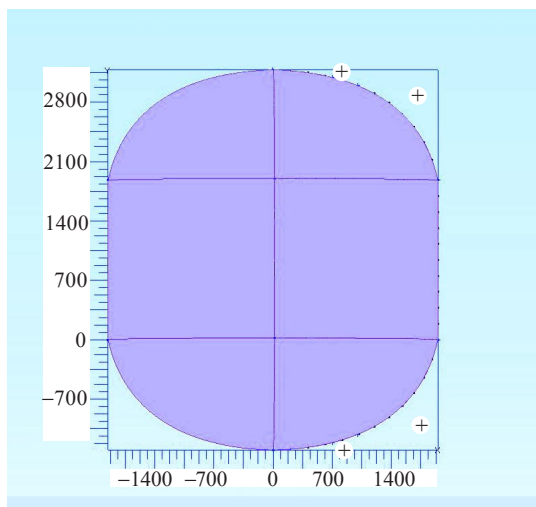


Рис. 1

Модель такой оболочки строилась на базе метода конечного элемента. Использовался многослойный конечный элемент. По толщине элемент состоял из пяти слоев. Первый слой этого элемента состоял из изотропного алюминиевого сплава. Четыре других слоя представляли собой ортотропные слои. Моделирование волокнистых композитов усложняется их анизотропией, зависящей от направления волокон, порядка и места их расположения. При моделировании объемных элементов достаточно определить усредненные характеристики материала по всем направлениям. При моделировании двумерных элементов достаточно задаться жесткостными характеристиками в двух направлениях. Напряженное состояние такой оболочки нельзя считать безмоментным, так как отношение длины к радиусу рав-

но 0.9 и имеются сопряжения оболочек различной кривизны.

На оболочку наносилась сетка конечных элементов. Использовался многослойный плоский моментный конечный элемент. Первый слой этого элемента состоял из изотропного металлического материала. Остальные слои представляли собой ортотропный материал. Так как рассматривалась осесимметричная задача, то исследовалась четвертая часть оболочки. Оболочка в местах сопряжения подкреплялась шпангоутами. Закрепление оболочки проводилось исходя из условий симметрии. Задача решалась в пределах упругости.

3. Результаты расчета и их анализ

Был проведен статический расчет такой оболочки, определено напряженно-деформированное состояние конструкции. Расчеты проводились с использованием конечно-элементного комплекса «MSC/Nastran for Windows». Результаты расчета показали, что основное напряженное состояние оболочки моментное. В процессе расчета менялась толщина металлического слоя для соблюдения условий прочности. Анализ приведенных результатов показывает, что наиболее нагруженным является металлический слой, увеличение толщины композитных слоев не дает существенного снижения напряжений в металлическом слое. Напряжения в композитных слоях меньше предела прочности с большим запасом. Однако увеличение толщины герметизирующего слоя приводит к увеличению массы оболочки. Была решена задача определения динамической реакции оболочки на перегрузку. Перегрузка менялась во времени и моделировалась функцией Хевисайда. Оценено влияние динамического нагружения на оболочку и проведено сравнение со статическим расчетом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №09-01-00199-а).

Список литературы

1. Елпатьевский А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов. М.: Машиностроение, 1972. 168 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.

DYNAMIC RESPONSE OF A COMPOSITE SHELL TO PERIODICAL EXCITATION

V.N. Zaytsev

A statically and dynamically loaded composite cylindrical shell with elliptic bottoms and a hermetic layer is considered. The static and dynamic stressed-strained state is computed and the effect of dynamic loading is estimated.

Keywords: composite shell, layered construction, internal pressure, stresses, displacements, finite element method.