

Моделирование импульсного нагружения металлокомпозитных цилиндрических оболочек с частичным армированием

*Государственное предприятие «Государственное Киевское конструкторское бюро «Луч»
Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,*

На основе метода конечных элементов рассматривается расчет металлокомпозитных цилиндрических оболочек специального класса с частичным однонаправленным армированием.

В расчетной модели учитываются упругопластические свойства лайнера и дискретность расположения армирующих волокон в матрице связующего.

Ключевые слова: металлический лайнер, композитная оболочка, напряженно-деформированное состояние, модель.

Несущая способность металлических баллонов (оболочек), подверженных воздействию высокого давления, может быть существенно увеличена за счет намотки однонаправленного армирующего материала на его тонкостенную цилиндрическую часть (лейнер) [1].

Лейнер обеспечивает герметичность баллонов и одновременно используется в качестве технологической оснастки при намотке армирующей нити со связующим материалом.

Если волокно при намотке растягивается, то в металлическом корпусе возникают сжимающие напряжения, в результате чего текучесть материала лайнера начинается при более высоком давлении.

Для того, чтобы создать жесткую и надежную металлокомпозитную конструкцию, напряжения в материале лайнера должны превышать предел текучести [2]. При этом металлокомпозитная оболочка будет находиться в сложном напряженно-деформированном состоянии, которое обусловлено взаимодействием между слоями, а потере ее несущих способностей предшествует разрушение одного или нескольких компонент металлокомпозита.

Известно, что одним из существенных источников погрешностей расчёта являются модели материалов (совокупность зависимостей, которые связывают деформации и напряжения), которые применяются в расчетах [3].

При моделировании неоднородные композиты часто приходится рассматривать как сплошные материалы, при этом эквивалентный материал считается анизотропным однородным материалом. Преимущества такого подхода – экономичность вычислительных схем, а основной недостаток - невозможность определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности и на границах раздела волокон и связующего. Кроме этого, необходимым является установление упругих констант анизотропии на основе методов микромеханики или проведения громоздких экспериментов. Для оценки прочности приходится вводить модели разрушения, которые не совсем адекватны моделям разрушения материалов, входящих в композитную конструкцию, т. е.

напряжения в анизотропном материале не соответствуют реальным напряжениям в волокнах и матрице [4,5].

Преимуществом дискретного подхода является возможность непосредственного определения локальных напряжений и деформаций, т.е. краевых эффектов у границ материалов, которые вызваны разрывностью свойств материала и учет которых важен при проектировании рациональной конструкции. Кроме того, для изотропных материалов, которые образуют металлокомпозитную конструкцию, разработаны надежные критерии прогнозирования прочности.

При использовании трехмерной дискретной модели метода конечных элементов при большом количестве слоев композита требуется мелкая сетка элементов для учета каждого волокна, что приводит к значительной трудоемкости построения конечно-элементной модели, поэтому по возможности следует применять осесимметричные модели, если таковые допускаются по расчетной схеме.

Цель данной статьи - моделирование импульсного нагружения малогабаритных металлокомпозитных цилиндрических оболочек с учетом упругопластических свойств лайнера и дискретного расположения армирующих волокон в матрице связующего.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- создать модель цилиндрической металлокомпозитной оболочки;
- определить перемещения и напряжения в стенке лайнера и композите;
- экспериментально исследовать процесс деформирования цилиндрической оболочки.

Рассмотрим металлокомпозитный цилиндрический сосуд, часть которого подкреплена однонаправленно армированным композиционным материалом. Используется упругопластическая модель материала лайнера, модели волокна и связующего - упругие изотропные материалы. Характеристики связующей среды отличны от характеристик волокон.

Моделирование проводится методом конечных элементов. Начальными данными для моделирования являются: геометрия конструкции металлокомпозитной цилиндрической оболочки, представленная в виде совокупности конечно-элементных сеток; модели материалов; условия нагружения конструкции и критерии разрушения для применяемых материалов. Предполагается, что волокна, связующее и лайнер идеально скреплены друг с другом.

Для подтверждения расчетной модели были проведены тестовые расчеты в линейной постановке на основании формул [2] и расчетов с применением построенной конечно - элементарной модели для упругопластического материала.

Расчет перемещений выполнен по аналитической формуле:

$$W_p = \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \frac{r^2}{ES} p \quad (1)$$

Тестовые расчеты проведем при следующих исходных данных:

- внутреннее давление $P=45 \cdot 10^6$ Па
- радиус оболочки $r=0,0612$ м
- модуль упругости материала корпуса $E=2 \cdot 10^{11}$ Па
- толщина оболочки $S=0,003$ м

- коэффициент Пуассона $\mu=0,3$.

Максимальный прогиб цилиндрической обечайки $W_p \approx 0,24$ мм.

Фрагменты геометрической модели цилиндрической металлокомпозитной оболочки и взаимное расположение слоев показаны на рис.1.

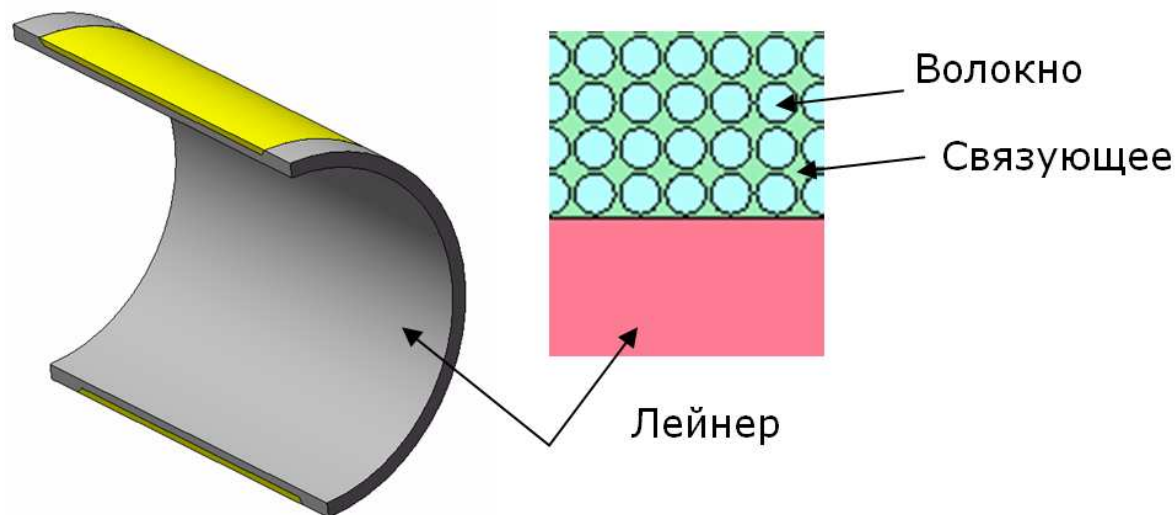


Рис. 1. Модель цилиндрической металлокомпозитной оболочки и взаимное расположение слоев

На первом этапе моделирования в двумерной постановке решалась осесимметричная задача, конечно - элементное разбиение для которой показано на рис. 2.

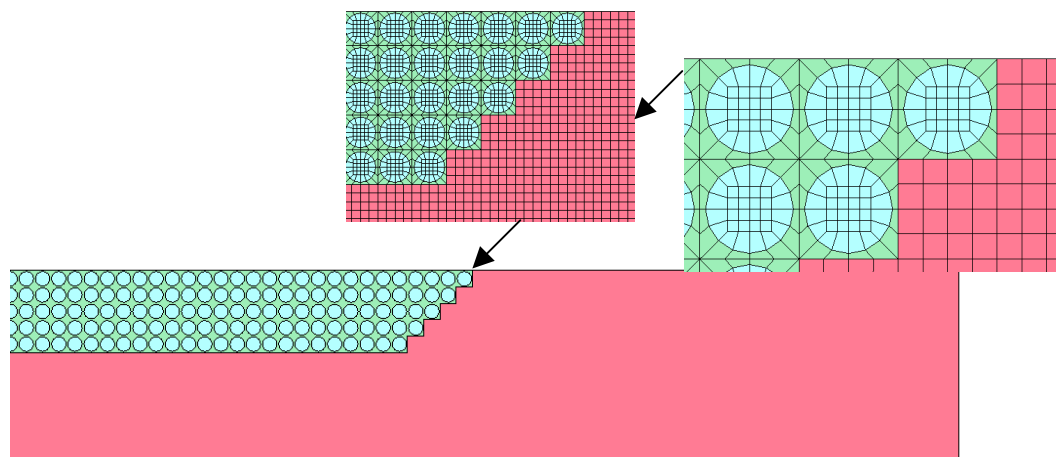


Рис. 2. Конечно - элементное разбиение модели

Для лейнера принята упругопластическая билинейная модель деформирования, модуль упругости материала лейнера $E = 2,1 \cdot 10^6$ МПа, напряжение текучести $\sigma_T = 860 \cdot 10^6$ Па, тангенциальный модуль $E_T = 100 \cdot 10^6$ Па, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$, плотность $7,85 \cdot 10^3$ кг/м³, минимальная толщина обечайки 0,003 м.

Упругие свойства компонентов композита: модуль упругости $E=120 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\mu=0,34$, плотность $1,37 \cdot 10^3$ кг/м³ для органоволокон СВМ-29,4 и модуль упругости $E=3,1 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\mu=0,42$, плотность $1,17 \cdot 10^3$ кг/м³ для матрицы наполнителя ЭДТ-10. Наружный диаметр композита $D_n = 127$ мм, толщина композитного слоя $h_{сл} = 2,25$ мм, концентрация объема волокон $V_f = 0,56$.

Внутреннее давление изменялось по треугольному закону с максимальным значением $P_{max}=71,4$ МПа в момент времени $t=1$ мс и равным нулю при $t=2$ мс.

Изменение радиального перемещения по времени для точек, расположенных на внутренней и внешней поверхностях в центральном сечении цилиндрической оболочки показано на рис.3. Кривые перемещения имеют колебательный характер, присущий волновым процессам при импульсном нагружении.

При достижении материалом лейнера предела текучести отмечается резкое увеличение прогибов оболочки, а после снятия нагрузки появляются остаточные деформации, максимальные величины которых лежат в пределах 0.22 мм для внешней поверхности (кривая 1) и 0.25 мм для внутренней (кривая 2).

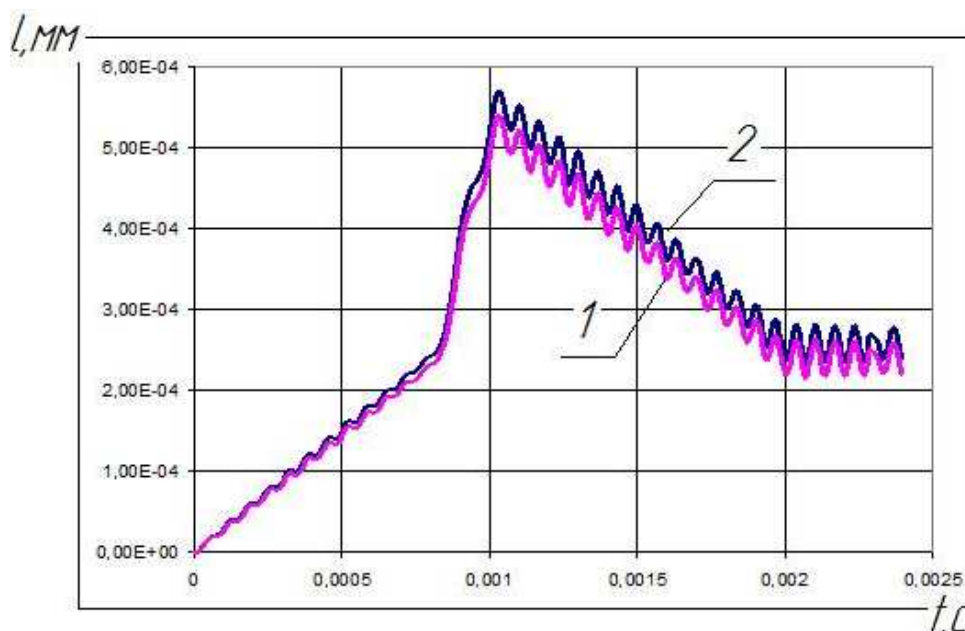


Рис. 3. Изменение радиального перемещения

На рис. 4 приведены радиальные напряжения, действующие в центральном поперечном сечении оболочки для лейнера (кривая 1), волокна (кривая 2) и связующего (кривая 3). Каждая отдельная зависимость из рис. 4, характерна для всех точек, лежащих в соответствующих областях, которые занимают компоненты металлокомпозита.

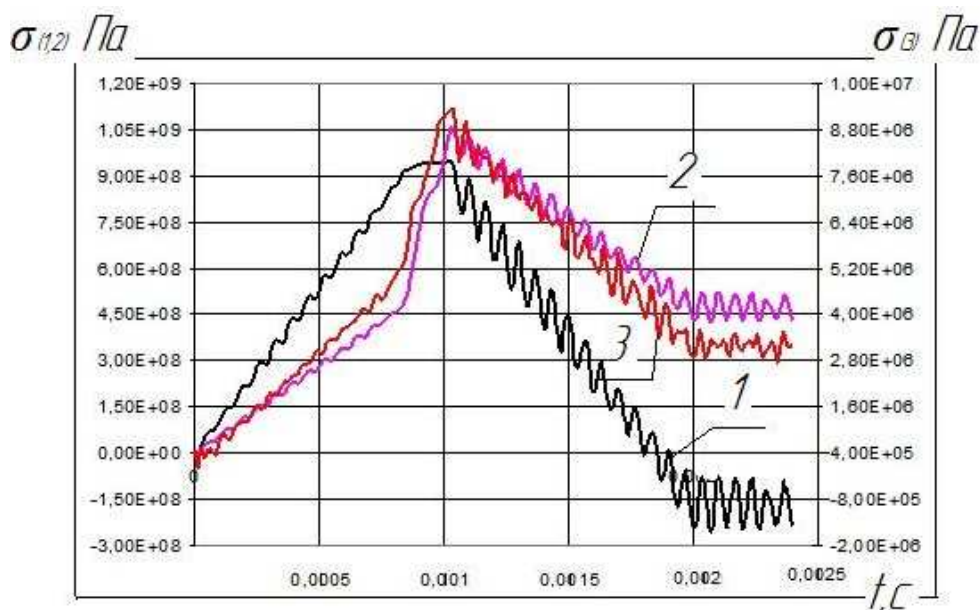


Рис. 4. Радиальные напряжения, действующие в центральном поперечном сечении оболочки

На рис. 5 показан общий вид распределения радиальных напряжений, действующих в лейнере (A), волокнах (B) и связующем (N).

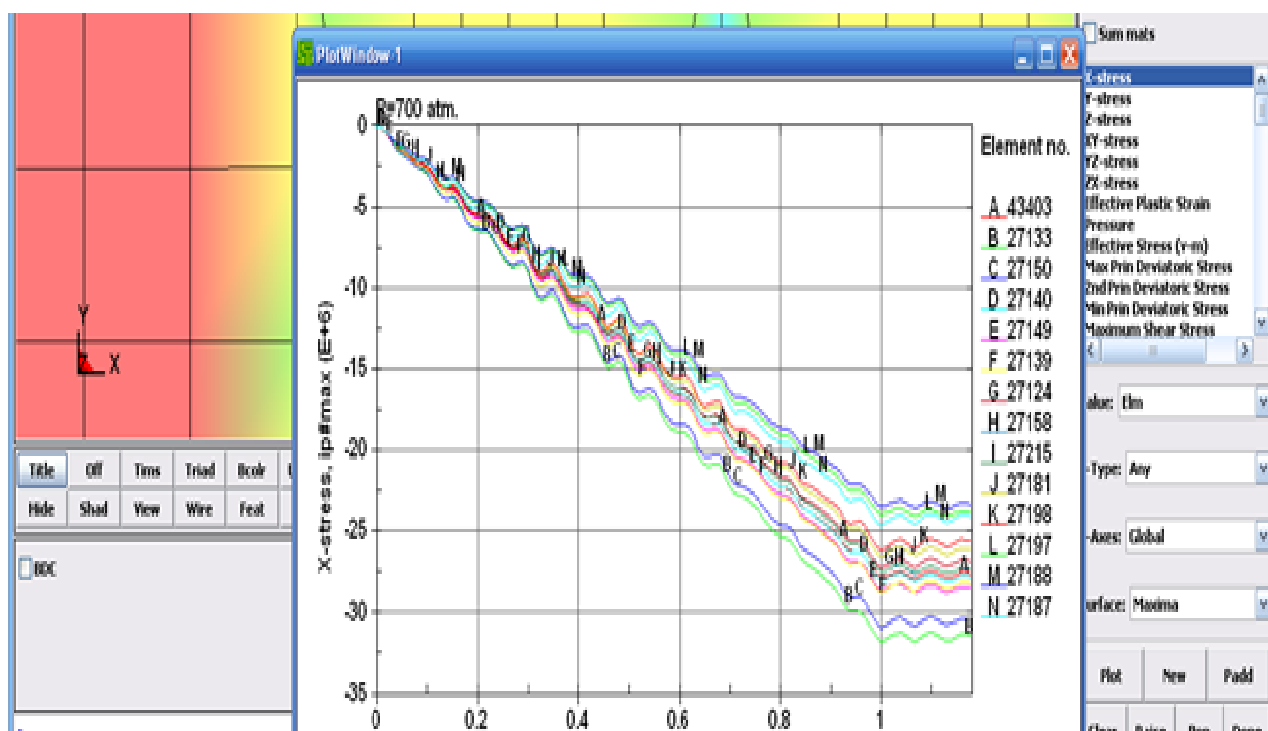


Рис. 5. Общий вид распределения радиальных напряжений

Для подтверждения расчетов было проведено экспериментальное исследования процесса деформирования цилиндрической оболочки, находящейся под переменным внутренним давлением. Экспериментальные образцы лейнера обматывались органонитью (рис.6) на намоточном станке с ЧПУ (рис.7) с дальнейшей полимеризацией в печи.

Полученные, таким образом, металлокомпозитные оболочки нагружались гидростатическим давлением.



Рис. 6. Образец лейнера



Рис. 7. Намоточном станке с ЧПУ

Для эксперимента выбраны следующие структурно-технологические параметры намотки (табл.1).

Таблица 1

Структурно-технологические параметры намотки

| №п/п | Наименование параметров | Значения параметров |
|------|------------------------------------|---------------------|
| 1. | Армирующий наполнитель: органонить | СВМ-29,4 |
| 2. | Количество жгутов в ленте | 10 |
| 3. | Связующее | ЭДТ-10 |
| 4. | Коэффициент армирования, % | 65±2% |
| 5. | Температура связующего, °С | 60±2 |
| 6. | Натяжение на ленту, Н | 8,8 |
| 7. | Диаметр отжимной фильеры, мм | 0,8 |
| 8. | Количество фильер | 1 |

Измерения диаметров корпуса (D_1 , D_2) проводились в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в средней части корпуса оболочки.

Результаты эксперимента приведены в таблице 2, а на рис. 8 показана зависимость осредненных значений деформаций от величины давления.

Измерения диаметров корпуса

| № измерения | Давление P, МПа | Диаметр D ₁ , мм | Диаметр D ₂ , мм |
|-------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0 | 126,9 | 127,1 |
| 2 | 51,0 | 127,0 | 127,2 |
| 3 | 56,1 | 127,2 | 127,3 |
| 4 | 66,3 | 127,4 | 127,4 |
| 5 | 71,4 | 127,7 | 127,5 |

При этом экспериментальная остаточная радиальная деформация корпуса ΔR_0 составляет 0,3мм, а ее расчетное значение равно $\Delta R_p \approx 0,25$ мм.

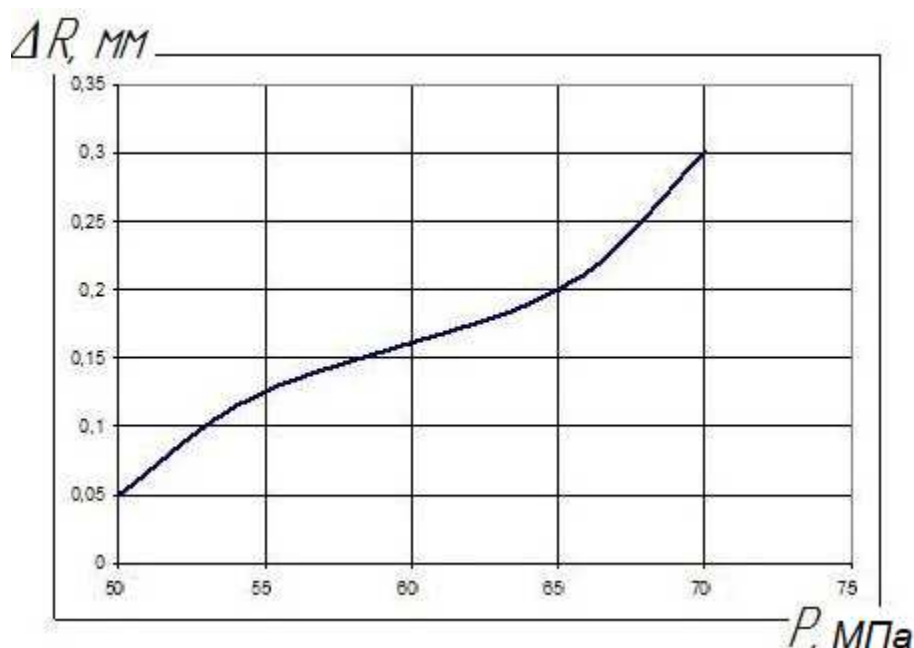


Рис. 8. Зависимость осредненных значений деформаций от величины давления

Сравнительный анализ показывает, что без армирования максимальное увеличение диаметра корпуса при давлении $P=35,7$ МПа равно 0,3 мм, при давлении $P=71,4$ МПа расчётное изменение диаметра для корпуса составляет 5 мм. Диаметр же корпуса, армированный органоволокном, остаётся равным 0,3 мм.

Выводы

1. Разработана методика расчёта металлокомпозитных цилиндрических оболочек с частичным армированием на основе метода конечных элементов.
2. Проведено моделирование импульсного нагружения металлокомпозитных цилиндрических оболочек с частичным армированием с учётом упруго-пластических свойств лайнера и дискретности расположения армирующих волокон в матрице.

3. Методика может быть применена для проектировочного расчёта корпусов с наружным армированием при наличии экспериментальных данных по упругим свойствам для различного намоточного слоя, включая объёмные доли волокна и связующего.

Список литературы

1. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А, Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов, М., Машиностроение, 1984, 264 с
2. Росато Д.В., Грове К.С. Намотка стеклонитью.- М.: Машиностроение, 1969.- 310 с.
3. Вольмир А.С. Устойчивость деформированных систем, М., Наука, 1967, 984 с.
4. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек, М., Наука, 1974, 448 с.
5. Ромащенко В.А, Тарасовская С.А. Деменко В. Ф. Численное моделирование динамики толстостенных многослойных спирально армированных цилиндрических оболочек Сб. научн. труд. – Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, вып. 23 Харьков, ХАИ, 2004, с.170-182.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. Каф. А.Г. Гребенников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 12.03.13

Моделювання імпульсної навантаженості металокомпозитних циліндричних оболонок з частковим армуванням

На основі методу кінцевих елементів розглядається розрахунок металокомпозитних циліндричних оболонок спеціального класу з частковим односпрямованим армуванням.

У розрахунковій моделі враховуються пружнопластичної властивостей Лейнер і дискретність розташування армуючих волокон у матриці сполучного.

Ключові слова: металевий лейнер, композитна оболонка, напружено-деформований стан, модель

Simulation of pulse loading of metal-cylindrical shells with partial reinforcements

The article, based on the finite element calculation is considered metal-cylindrical shells of a special class with partial unidirectional reinforcement.

The computational model accounts for elastoplastic properties liner and discrete arrangement of reinforcing fibers in the matrix of the binder.

Keywords: metal liner, composite shell, the stress-strain state, the model.