

## **Конечноэлементный анализ и экспериментальное исследование прочности трехслойной сотовой конструкции переходного отсека космического летательного аппарата**

**Д. В. Акимов<sup>а</sup>, В. З. Грищак<sup>б,1</sup>, С. И. Гоменюк<sup>б</sup>, И. Ф. Ларионов<sup>а</sup>, Д. В. Клименко<sup>а</sup>, В. Н. Сиренко<sup>а</sup>**

<sup>а</sup> Государственное предприятие “Конструкторское бюро “Южное”, Днепропетровск, Украина

<sup>б</sup> Запорожский национальный университет, Запорожье, Украина

<sup>1</sup> grk@znu.edu.ua

*На основе конечноэлементной модели исследуется влияние характера изменения армирования материала трехслойной конструкции переходного отсека космического летательного аппарата на напряженно-деформированное состояние и несущую способность с целью обеспечения прочности отсека. Расчетные данные сопоставляются с экспериментальными.*

**Ключевые слова:** прочность, сотовая конструкция, переходной отсек, космический летательный аппарат.

**Введение.** Слоистые конструкции из композитных материалов получили широкое распространение при проектировании силовых отсеков космических летательных аппаратов (КЛА). Использование анизотропных материалов позволяет оптимизировать не только физические свойства конструкции (распределение массы, обеспечение теплозащиты и звукопроницаемости), но и другие, сохраняя при этом необходимые механические характеристики.

При численном анализе напряженно-деформированного состояния конструкций оболочечного типа можно выделить два основных подхода к моделированию слоистых конструкций:

- 1) явное моделирование конструкции при наличии разрывных свойств материала;
- 2) построение эквивалентной непрерывной модели.

Среди методов, основанных на первом подходе, можно выделить метод, названный анализом разрывных деформаций (discontinuous deformation analysis (DDA)) [1], и метод дискретных элементов (discrete element method (DEM)) [2, 3]. К ним можно отнести также модификации методов конечных элементов и конечных разностей, позволяющих учитывать характер разрывности свойств и структуры слоев материала исследуемой конструкции. Следует отметить, что метод дискретных элементов и анализ разрывных деформаций широко используются в задачах механики горных пород, исследовании гранулированных тел и динамики сыпучих материалов. Однако реализация этих методов для исследования многослойных конструкций сложной формы вызывает определенные трудности. Для реализации метода конечных элементов (МКЭ) при таком подходе необходимо учитывать структуру слоев материала.

Методы второго подхода основаны на эквивалентной однородности континуума материала [4] с использованием МКЭ и конечных разностей. При таком подходе в МКЭ добавляются дополнительные степени свободы, связанные, например, с вращением в узлах.

В данной работе для исследования напряженно-деформированного состояния и несущей способности переходного отсека КЛА предлагается использовать МКЭ,

реализованный в программном комплексе MSC/NASTRAN [5, 6], что позволяет учитывать особенности силовой схемы, свойств материала, характера внешней нагрузки и граничных условий. В качестве основной ставится задача верификации предложенной конечноэлементной модели с точки зрения ее соответствия натурному объекту и проведение численного анализа с целью определения оптимальной толщины обшивок вследствие изменения схемы армирования для обеспечения прочности исследуемой конструкции.

**Описание объекта исследования.** Переходный отсек (ПО) космического летательного аппарата – один из наиболее важных конструктивных силовых элементов, обеспечение прочности и, следовательно, надежности которого является одной из главных задач при создании либо модернизации КЛА.

Переходный отсек выполнен в виде усеченного конуса высотой  $H$ , длиной образующей  $L$ , диаметром нижнего основания  $d$  и верхнего –  $D = d + 1/3d$ . Корпус ПО включает оболочку, верхний и нижний стыковочные шпангоуты. Оболочка представляет собой трехслойную конструкцию, состоящую из наружной и внутренней обшивок, а также сотового заполнителя. В местах расположения люков на боковой поверхности корпуса есть окантовки. Обшивки толщиной  $h$  имеют симметричную схему армирования, верхний и нижний стыковочные шпангоуты, окантовки люков выполнены из композитного материала. Схема армирования верхнего и нижнего шпангоутов с толщиной полок  $h_p$  и стенок  $h_s$  симметричная и периодически повторяется до обеспечения конструктивной толщины. Для равномерной передачи сжимающих усилий на конструкцию обеспечен плавный переход по толщине.

Общая конструктивная схема ПО и шпангоутов представлена на рис. 1 и 2, схема нагружения – на рис. 3.

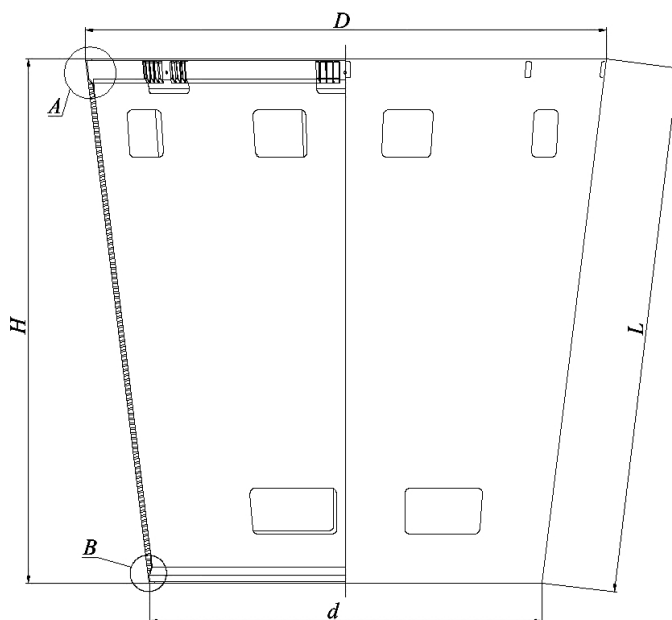


Рис. 1. Общая конструктивная схема переходного отсека.

**Экспериментальное исследование прочности отсека.** Переходный отсек подвергался статическим испытаниям при комбинированном нагружении. В соответствии с рис. 3 основными силовыми факторами, вызывающими потерю устойчивости и исчерпание несущей способности конструкции ПО, являются изгибающий момент, осевое сжимающее усилие и поперечная сила. По достижении значений критических

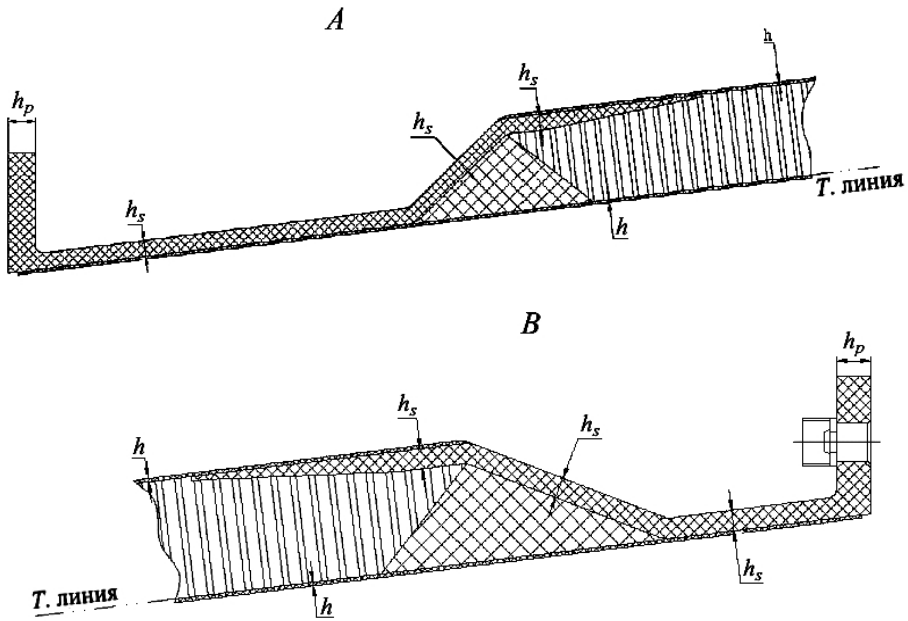


Рис. 2. Верхний и нижний шпангоуты переходного отсека.

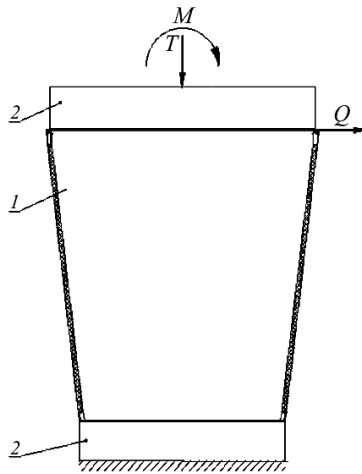


Рис. 3. Схема нагружения переходного отсека осевыми, поперечными силами и изгибающим моментом: 1 – корпус ПО; 2 – технологические обечайки.

нагрузок ( $M = A$ ,  $Q = B$ ,  $T = C$ ) произошла потеря устойчивости исходной формы равновесия конструкции и ее разрушение с исчерпанием несущей способности. При нагрузках, близких к критическим, следует отметить, что имело место разрушение корпуса ПО в виде разрыва по спирали от окантовки конструкции из-за нарушения целостности наружной обшивки с дальнейшей потерей устойчивости трехслойной оболочки и образованием трещин. В зоне разрушения выявлено расслоение наружной и внутренней обшивок на части длины от нижнего торца и разрыв вертикальных стенок окантовок с отслоением материала.

Характер разрушения ПО представлен на рис. 4. Видно, что определяющим разрушающим фактором при проведении испытаний является межслоевой сдвиг наружной обшивки.



Рис. 4. Характер разрушения переходного отсека.

**Конечноэлементная модель расчета прочности ПО.** Для определения напряженно-деформированного состояния ПО предложена конечноэлементная модель с учетом технологических обечайек, имитирующая нагружение конструкции при “квазистатических” испытаниях.

При построении конечноэлементной модели ПО были использованы следующие типы конечных элементов:

для моделирования технологических обечайек – оболочечный конечный элемент с упругими свойствами, соответствующими материалу обечайек;

для моделирования оболочки переходного отсека – слоистый конечный элемент с соответствующими упругими свойствами каждого слоя;

для моделирования нижнего и верхнего шпангоутов переходного отсека – балочный конечный элемент с упругими свойствами.

По верхнему сечению модель нагружалась соответствующими силовыми факторами. В качестве граничных условий принята система осевых и тангенциальных связей на нижней технологической обечайке.

Конечноэлементная модель расчета ПО представлена на рис. 5.

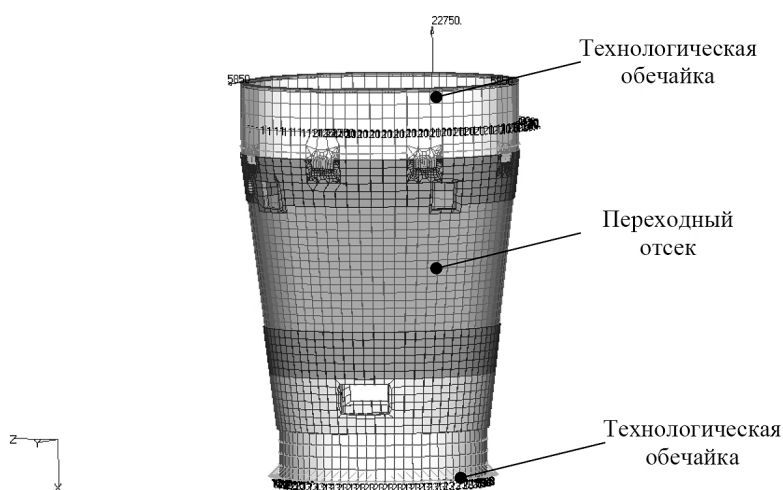


Рис. 5. Конечноэлементная модель расчета переходного отсека.

Для проверки соответствия построенной конечноэлементной модели натурной конструкции, подверженной испытанию, проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными по величине перемещений (таблица). Из данных таблицы видно их удовлетворительное соответствие.

**Сравнение расчетных данных с экспериментальными по величине перемещений**

Этап нагружения	№ датчика	$U_r^3$	$U_r^p$
1-й	1	<u>8,387</u>	<u>12,80</u>
		0,539	
	2	<u>11,510</u>	
		0,754	
3	<u>12,310</u>		
	1,193		
4	<u>13,670</u>		
	1,354		
2-й	1	<u>12,790</u>	<u>12,35</u>
		1,133	
	2	<u>12,500</u>	
		—	
3	<u>12,740</u>		
	1,235		
4	<u>11,710</u>		
	1,360		

**Примечание.** 1. Над чертой приведены данные для верхнего шпангоута ПО, под чертой – для нижнего. 2.  $U_r^3$  – фактическое перемещение точек ПО в радиальном направлении по показаниям датчиков перемещений,  $U_r^p$  – расчетное перемещение точек ПО в радиальном направлении.

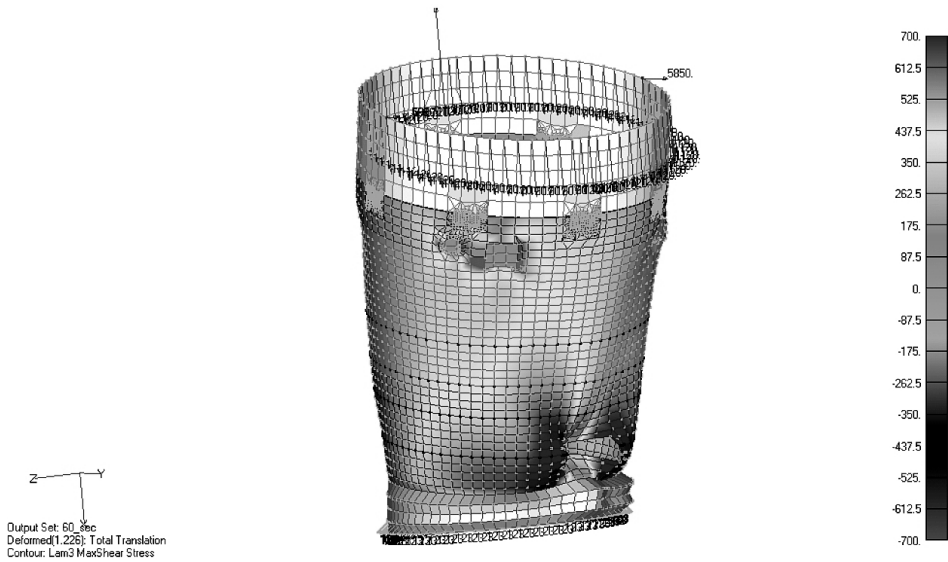


Рис. 6. Распределение максимальных расчетных сдвиговых напряжений ( $\tau_{max}^p = 844...912$  МПа) в наружной обшивке ПО (предельная величина напряжений межслоевого сдвига обшивок  $\tau_{пр} = 700$  МПа).

**Расчет переходного отсека по разрушающим нагрузкам.** Для исследования исчерпания несущей способности конструкции ПО проведен расчет конечноэлементной модели при максимальных нагрузках, превышающих критические ( $M = A + 6\%$  от величины  $A$ ,  $Q = B + 4\%$  от величины  $B$ ,  $T = C + 24\%$  от величины  $C$ ). Характер распределения касательных напряжений в обшивках отсека при нагружении максимальными нагрузками приведен на рис. 6.

## Резюме

На основі скінченноелементної моделі досліджується вплив характеру зміни армування матеріалу тришарової конструкції перехідного відсіку космічного літального апарату на напружено-деформований стан і несівну здатність із метою забезпечення міцності відсіку. Розрахункові дані зіставляються з експериментальними.

1. *MacLaughlin M. M. and Doolin D. M.* Review of validation of the discontinuous deformation analysis (DDA) method // *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* – 2006. – **30**, No. 4. – P. 271–305.
2. *Pande G. N., Beer G., and Williams J. R.* Numerical Methods in Rock Mechanics. – Chichester: Wiley, 1990. – 327 p.
3. *Williams J. R. and O'Connor R.* Discrete element simulation and the contact problem // *Arch. Comput. Meth. Eng.* – 1999. – **6**, No. 4. – P. 279–304.
4. *Riahi A. and Curran J. H.* Full 3D finite element Cosserat formulation with application in layered structures // *Appl. Math. Model.* – 2009. – **33**, No. 8. – P. 3450–3464.
5. *MSC.Nastran 2005 Release Guide.* – MSC Software Corporation, Santa Ana, CA, 2004.
6. *MSC.Nastran Quick Reference Guide.* – MSC Software Corporation, Santa Ana, CA, 2004.

Поступила 16. 02. 2015