

# Новые материалы и технологии

УДК 620.22-419.8

## Расчетный анализ и оптимизация многостеночных композитных несущих оболочек

А.А. Смердов, Фан Тхе Шон

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

## Design analysis and optimization of composite multiwalled load-bearing shells

A.A. Smerdov, Fan Tkhe Shon

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.



e-mail: asmerdov@mail.ru, Phantheson80@yahoo.com



В настоящее время актуальным является исследование новой конструктивной схемы несущей оболочки — многостеночной композитной структуры, при изготовлении которой могут быть использованы перспективные технологии инфузии и инъекции. Разработана методика проектных расчетов, содержащая простые инженерные формулы, пригодные при многократном переборе вариантов, который проводится при оптимизации конструкции. С использованием полученных формул проведено расчетное исследование несущей способности оболочек с учетом различных механизмов истощения прочности и потери устойчивости. Составлены расчетные алгоритмы и разработаны программные средства для параметрического анализа и оптимизации многостеночных оболочек. На примере конкретного отсека разгонного блока выполнен численный анализ влияния различных параметров на несущую способность конструкции. Показано, что увеличение высоты стенки обуславливает необходимость учета поперечных сдвигов. Проведена сравнительная оптимизация многостеночных и трехслойных оболочек с сотовым наполнителем; построены зависимости, связывающие массу и несущую способность оптимальных конструкций.

**Ключевые слова:** композит, многостеночная оболочка, прочность, устойчивость, расчет, оптимизация.



The study of a new design of a multiwalled load-bearing composite shell is currently of great importance. Manufacturing such structures implies using advanced infusion and injection technologies. In this paper, a technique for design calculations is developed. It contains simple engineering formulas for multiple searches in the design optimization. Using these formulas, the numerical analysis of load-bearing capacity of shells is performed taking into account various mechanisms of compressive and buckling strength exhaustions. Design algorithms and software for the parametric analysis and optimization of multiwalled shells are developed. A numerical analysis of the influence of various parameters on the carrier capacity of a particular booster module structure is carried out. It is shown that increasing height involves transverse shear. The comparative optimization of multiwalled and three-layer shells with a honeycomb core is performed. The dependence of the mass on the carrying capacity of optimal designs is established.

**Keywords:** composite, multiwalled shell, strength, stability, calculation, optimization.

Многостеночные композитные оболочки — сравнительно новый тип несущих конструкций ракетно-космической техники [1, 2] из углепластиков [3, 4], при изготовлении которых могут быть использованы перспективные технологии инфузии и инъекции [5]. Применение этих оболочек перспективно в отсеках и обтекателях ракет, корпусах космических аппаратов, тубусах космических телескопов и фотоаппаратов. С точки зрения технологии изготовления их можно отнести к интегральным панельным конструкциям [6], однако по особенностям своей несущей способности они ближе к трехслойным несущим оболочкам [7, 8].

Многостеночная панель и схема ее элементарной ячейки показаны на рис. 1, а и б. Основными элементами многостеночной оболочки являются обшивки 1 и стенки 2, причем каждый из этих элементов может иметь многослойную структуру (рис. 1, в). Кроме того, конструкция может содержать вставки 3, которые обычно представляют собой однонаправленные стержни, предварительно отформованные методом пултрузии.

Цель работы — создание методики проектных расчетов композитных многостеночных оболочек с простыми инженерными формулами, пригодными для многократного перебора вариантов при оптимизации конструкции.

Многостеночные конструкции как объект проектирования обладают большими возможностями. К числу варьируемых параметров при их оптимизации могут относиться:

- размеры элементарной ячейки — высота стенки  $h$  и ширина клетки  $t$ ;
- структурные параметры обшивок и стенок — толщины отдельных слоев  $\delta_i$  и углы ориентации этих слоев  $\varphi_i$ ;
- наличие/отсутствие вставок и радиус вставки  $r_v$ .

Кроме того, могут использоваться различные сочетания характеристик материалов обшивок, стенок и вставок.

В многослойных композитных конструкциях обычно применяются ортотропные пакеты, в которых половина волокон в каждом слое уложена под углом  $+\varphi_i$  к оси  $x$  конструкции, а другая половина — под углом  $-\varphi_i$  (см. рис. 1, в). Такие конструкции изучаются и в данной работе.

Рассмотрим тонкостенную цилиндрическую многостеночную оболочку с радиусом  $R$  и длиной  $L$  с одинаковыми симметрично расположенными обшивками. Ось  $x$  глобальной системы координат направлена по образующей цилиндра, ось  $y$  — по касательной,  $z$  — по радиусу. Начало отсчета координаты  $z$  — от срединной поверхности оболочки. Оболочка нагружена осевой сжимающей/растягивающей силой  $N$ , к которой может также быть добавлено внешнее/внутреннее давление  $p$  (положительные значения нагрузок, как обычно, соответствуют растяжению).

Основными критериями качества при оптимальном проектировании ракетно-космических несущих конструкций являются масса и несущая способность.

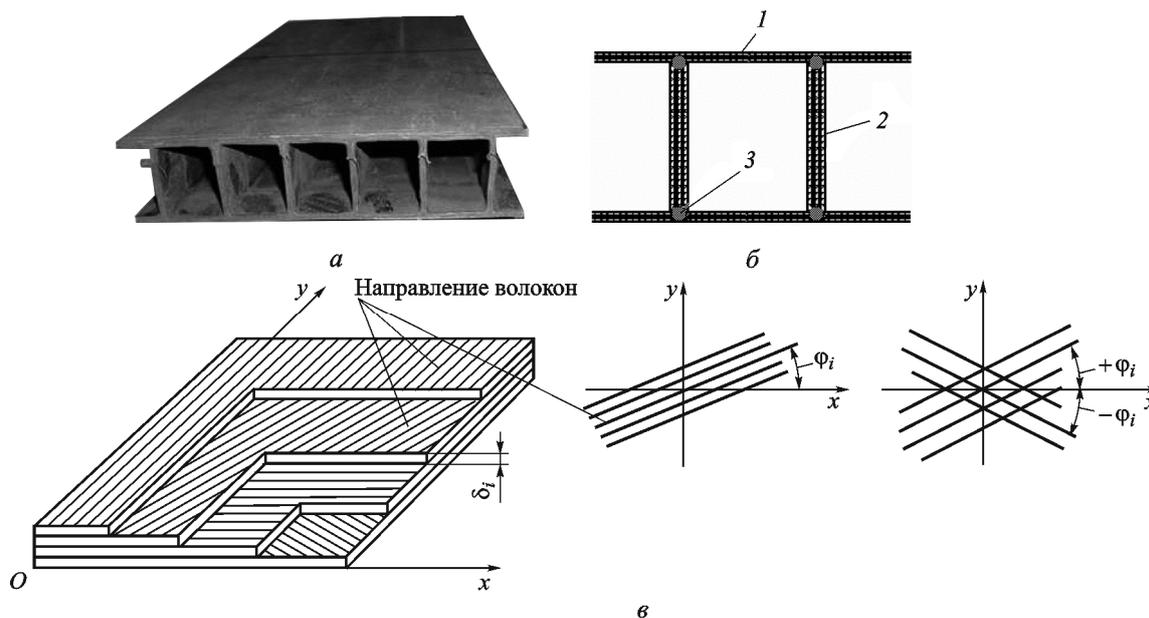


Рис. 1. Композитная многостеночная панель (а), ее основные элементы (б) и структура обшивок и стенок (в): 1 — обшивка; 2 — стенка; 3 — вставка

Масса несущей оболочки рассчитывается по формуле

$$M = 2\pi RL \left( 2\delta\rho + \frac{\delta_c h \rho_c + 2\pi r_B^2 \rho_B}{t} \right),$$

где  $\delta$  и  $\delta_c$  — толщины обшивок и стенок;  $\rho$  и  $\rho_c$  — средняя плотность материала обшивок и стенок, определяемые согласно [9];  $\rho_B$  — плотность вставок.

Как и для всех немонолитных оболочечных конструкций, несущая способность многостеночных оболочек может определяться прочностью, общей и местной устойчивостью [10]. Запасы прочности в данном случае должны определяться отдельно для обшивок, стенок и вставок. Прочность обшивок и стенок может быть рассчитана по первому разрушению или по предельной несущей способности с использованием алгоритмов, изложенных в работах [7, 9]. При этом векторы начальных напряжений в многослойных структурах имеют вид:

- для обшивок

$$\begin{pmatrix} \sigma_x^{(0)} \\ \sigma_y^{(0)} \\ \tau_{xy}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{NE_x}{EF} \\ \frac{pR}{\delta} \\ 0 \end{pmatrix};$$

- для стенок

$$\begin{pmatrix} \sigma_x^{(0)} \\ \sigma_y^{(0)} \\ \tau_{xy}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{NE_x^{(c)}}{EF} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Здесь  $E_x$ ,  $E_x^{(c)}$  — средние модули упругости многослойных обшивок и стенок, определяемые согласно [7, 9];  $EF$  — жесткость конструкции при осевом растяжении-сжатии,

$$EF = 2\pi R \left( 2\delta E_x + \frac{\delta_c h E_x^{(c)} + 2\pi r_B^2 E_B}{t} \right);$$

$E_B$  — продольный модуль упругости вставок.

Запас прочности вставок

$$Z_{\text{нп}}^{(B)} = \frac{EF[\sigma_B]}{NE_B},$$

где  $[\sigma_B]$  — предел прочности вставок при растяжении или сжатии.

Общая устойчивость многостеночной оболочки может быть рассчитана двумя способами. Если высота ребер не слишком велика, можно рассматривать конструкцию как конструктивно-анизотропную оболочку с условно-однородным слоем ребер [11] и считать спра-

ведливыми гипотезы Кирхгофа — Лява [10]. В этом случае расчетная формула для собственных значений параметра нагрузки  $P_{mn}$  [12] с учетом симметрии многостеночной структуры принимает вид

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} + b_{33}P_{mn} \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Здесь

$$a_{11} = \lambda_m^2 B_{xx} + \lambda_n^2 B_{ss};$$

$$a_{12} = a_{21} = \lambda_m \lambda_n (B_{xy} + B_{ss});$$

$$a_{13} = a_{31} = -\lambda_m \frac{B_{xy}}{R};$$

$$a_{22} = \lambda_n^2 B_{yy} + \lambda_m^2 B_{ss}; \quad (2)$$

$$a_{23} = a_{32} = -\lambda_n \frac{B_{yy}}{R};$$

$$a_{33} = \frac{B_{yy}}{R^2} + \lambda_m^4 D_{xx} + \lambda_m^2 \lambda_n^2 (2D_{xy} + 4D_{ss}) + \lambda_n^4 D_{yy};$$

$$b_{33} = \lambda_m^2 T_x^{(0)} + \lambda_n^2 T_y^{(0)}; \quad (3)$$

$$\lambda_m = \frac{m\pi}{L}; \quad \lambda_n = \frac{n\pi}{b};$$

$$T_x^{(0)} = \frac{N}{2\pi R}; \quad T_y^{(0)} = pR$$

(при выводе последних выражений использована теория пологих оболочек). В выражениях (3)  $m = 1, 2, 3, \dots$  и  $n = 0, 2, 3, \dots$  — числа натурального ряда, причем каждая пара этих параметров соответствует своей собственной форме (формы с  $n = 0$  — осесимметричные).

Мембранные и изгибные жесткости оболочки, входящие в формулы (2) рассчитываются по следующим выражениям:

$$B_{xx} = \frac{2\delta E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} + \frac{\delta_c h E_x^{(c)} + 2\pi r_B^2 E_B}{t};$$

$$B_{yy} = \frac{2\delta E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}}; \quad B_{xy} = \nu_{xy} B_{yy}; \quad B_{ss} = 2\delta G_{xy};$$

$$D_{xx} = \frac{2\delta E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \left( \frac{h^2}{4} + \frac{\delta h}{2} + \frac{\delta^2}{3} \right) + \frac{\delta_c h^3 E_x^{(c)}}{12t} + \frac{\pi r_B^2 h^2 E_B}{4t};$$

$$D_{yy} = \frac{2\delta E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \left( \frac{h^2}{4} + \frac{\delta h}{2} + \frac{\delta^2}{3} \right); \quad D_{xy} = \nu_{xy} D_{yy};$$

$$D_{ss} = 2\delta G_{xy} \left( \frac{h^2}{4} + \frac{\delta h}{2} + \frac{\delta^2}{3} \right),$$

где  $E_y$ ,  $G_{xy}$ ,  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yx}$  — технические константы жесткости многослойной обшивки [7, 9].

Расчетный алгоритм должен осуществить перебор по числам натурального ряда  $m = 1, 2, 3, \dots, n = 0, 2, 3, \dots$ . Для определения запаса устойчивости реальной конструкции наименьшее из найденных значений следует умножить на коэффициент устойчивости [12–15], который учитывает влияние несовершенств оболочки:

$$Z_{уст.об} = k_{уст} \min_{m,n} \{P_{mn}\}.$$

Здесь  $k_{уст}$  — коэффициент, значение которого для реальных композитных оболочек зависит не только от точности их изготовления, но и от соотношения величин  $T_x^{(0)}$  и  $T_y^{(0)}$ . Так, для одной и той же подкрепленной или многостеночной оболочки при чистом осевом сжатии этот коэффициент может быть равен 0,4...0,5 [15], а при чистом внешнем давлении доходить до единицы [13].

Для расчета местной устойчивости могут быть использованы формулы устойчивости удлиненных пластин, сжатых вдоль длинных сторон [13, 14]. Тогда запасы устойчивости обшивок и стенок рассчитываются по формулам

$$Z_{уст.м}^{(o)} = \frac{k_{\sigma}^{(o)} \pi^2 D_{xx}^{(o)} E F}{N \delta t^2 E};$$

$$Z_{уст.м}^{(c)} = \frac{k_{\sigma}^{(c)} \pi^2 D_{xx}^{(c)} E F}{N \delta_c h^2 E_c},$$

где

$$k_{\sigma}^{(o)} = 2 \left( \sqrt{\frac{D_{yy}^{(o)}}{D_{xx}^{(o)}} + \frac{D_{xy}^{(o)} + 2D_{ss}^{(o)}}{D_{xx}^{(o)}}} \right);$$

$$k_{\sigma}^{(c)} = 2 \left( \sqrt{\frac{D_{yy}^{(c)}}{D_{xx}^{(c)}} + \frac{D_{xy}^{(c)} + 2D_{ss}^{(c)}}{D_{xx}^{(c)}}} \right);$$

$D_{xx}^{(o)}, D_{xy}^{(o)}, D_{yy}^{(o)}, D_{ss}^{(o)}, D_{xx}^{(c)}, D_{xy}^{(c)}, D_{yy}^{(c)}, D_{ss}^{(c)}$  — изгибные жесткости многослойных пакетов обшивки и стенки соответственно. Для симметричных относительно срединной плоскости пакетов эти величины рассчитываются относительно этой плоскости; если структуры несимметричны, то можно использовать приближенный прием, согласно которому изгибные жесткости определяются относительно поверхностей, для которых равны нулю статические моменты в направлении оси  $x$ .

Другой способ оценки общей устойчивости — использование кинематических гипотез ломаной линии [7]. В этом случае конструкция рассматривается как трехслойная оболочка, в которой роль заполнителя играет условно-однородный слой стенок. Алгоритм расчета

устойчивости изложен в [16]; необходимые для расчета величины модулей сдвига заполнителя в плоскостях  $xz$  и  $yz$   $G_{xz}^{(a)}$  и  $G_{yz}^{(a)}$  могут быть определены по следующим формулам:

$$G_{xz}^{(a)} = G_{xz}^{(c)} \frac{\delta_c}{t}; \tag{4a}$$

$$G_{yz}^{(a)} = \frac{24D_{yy}^{(c)}}{h^2 t}. \tag{46}$$

Здесь  $G_{xz}^{(c)}$  — средний модуль сдвига многослойного пакета, образующего стенку. Формула (4a) очевидна, при выводе формулы (46) полагалось, что сопротивление стенок сдвигу обшивок в плоскости  $yz$  связано с изгибом стенок, закрепление которых к обшивкам в данной задаче следует квалифицировать как заделку. Формула (46) получена из равенства энергии изгиба стенки и энергии сдвига условного заполнителя в объеме элементарной ячейки.

Объектом исследования выбрана силовая оболочка среднего переходника разгонного блока ДМ-SL, разработанного РКК «Энергия». Она представляет собой цилиндрическую оболочку диаметром 3,7 м и длиной 3,99 м, нагруженную осевой сжимающей силой 4,05 МН. Рассмотрены два материала обшивок и стенок — низко модульный углепластик ЛУ-П/ЭНФБ, до сих пор применяемый в отечественных ракетно-космических конструкциях, и современный высоко модульный углепластик М60J/Ероху. Принималось  $k_{уст} = 0,5$ .

Расчет прочности обшивок и стенок проводился по первому разрушению; для оценки общей устойчивости оболочки использовались оба

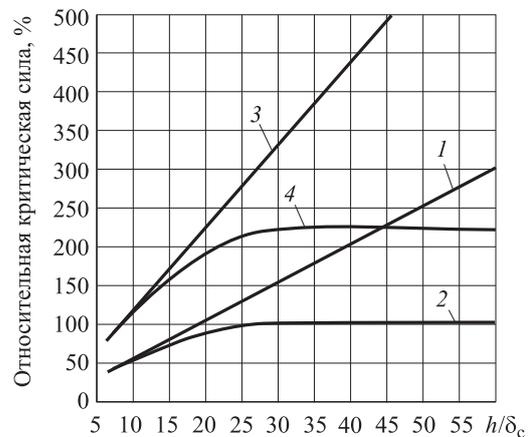


Рис. 2. Результаты расчета устойчивости многостеночной оболочки по гипотезам Кирхгофа — Лява (1, 3) и ломаной линии (2, 4):  
1, 2 — углепластик ЛУ-П/ЭНФБ;  
3, 4 — углепластик М60J/Ероху

изложенных выше способа. Сравнительный анализ этих способов иллюстрирует рис. 2, на котором изображены зависимости общей устойчивости многостеночной оболочки от размера элементарной ячейки. По оси абсцисс отложены значения относительной высоты стенки  $h/\delta_c$ , а по оси ординат — относительной критической силы осевого сжатия. При расчетах принято:  $\delta = \delta_c = 0,75$  мм,  $t = h$ ; структура обшивок и стенок  $[\pm 60^\circ/0^\circ/\pm 60^\circ]$ . За 100 % принята критическая нагрузка оболочки с  $h = t = 20$  мм, рассчитанная с использованием гипотез ломаной линии. Этот вариант конструкции является базовым для дальнейших исследований.

На рисунке видно, что при относительной высоте стенки более 20 использование гипотез Кирхгофа — Лява приводит к большим погрешностям и следует использовать гипотезы ломаной линии.

Проведенное исследование показало, что увеличение высоты стенки приводит к повышению общей устойчивости лишь до известного предела, после которого устойчивость практически остается неизменной. Этот максимальный уровень критической нагрузки сильно зависит от модуля упругости используемого материала, причем высокомодульные материалы способны обеспечить примерно в 2,5 раза большую устойчивость, чем низко модульные.

Результаты исследования зависимости несущей способности от характеристик армирования обшивок и стенок приведены на рис. 3. Расчеты проводились при  $\delta = \delta_c = 0,75$  мм,  $t = h = 25$  мм; по оси абсцисс отложены значения

угла  $\varphi$  при структуре обшивок и стенок  $[\pm\varphi/0^\circ/\pm\varphi]$ . Область несущей способности выделена серым фоном. Видно, что при изменении структуры армирования несущая способность может лимитироваться любым из рассмотренных механизмов; при этом оптимальные углы армирования перекрестно армированных слоев также могут изменяться в широких пределах.

Во всех приведенных выше расчетах полагалось, что элементарная ячейка квадратная, а обшивка и стенка одинаковы. Результаты анализа несущей способности многостеночных оболочек с различными обшивками и стенками представлены на рис. 4. По осям абсцисс отложены значения отношения высоты стенки к ширине клетки  $h/t$ , причем для сохранения неизменной массы конструкции полагалось, что толщина стенки изменяется вместе с величиной  $t$  так, что  $\delta_c h/t = \text{const}$ . Расчеты проводились при постоянном значении  $h = 25$  мм. Различные механизмы исчерпания несущей способности одинаковых структур обшивок и стенок из углепластика ЛУ-П/ЭНФБ разной толщины показаны на рис. 4, а.

Кривые, приведенные на рис. 4, б, построены для различных структур армирования стенки (структура обшивки во всех случаях оставалась  $[\pm 60^\circ/0^\circ/\pm 60^\circ]$ ). Здесь каждая кривая показывает несущую способность текущего варианта конструкции (что соответствует нижней огибающей кривых, изображенных на рис. 4, а). Структура стенки:  $[\pm 45^\circ]$  (кривые 1 и 4),  $[\pm 80^\circ]$  (кривые 2 и 5),  $[90^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$  (кривые 3 и 6) и  $[\pm 30^\circ]$  (кривая 7).

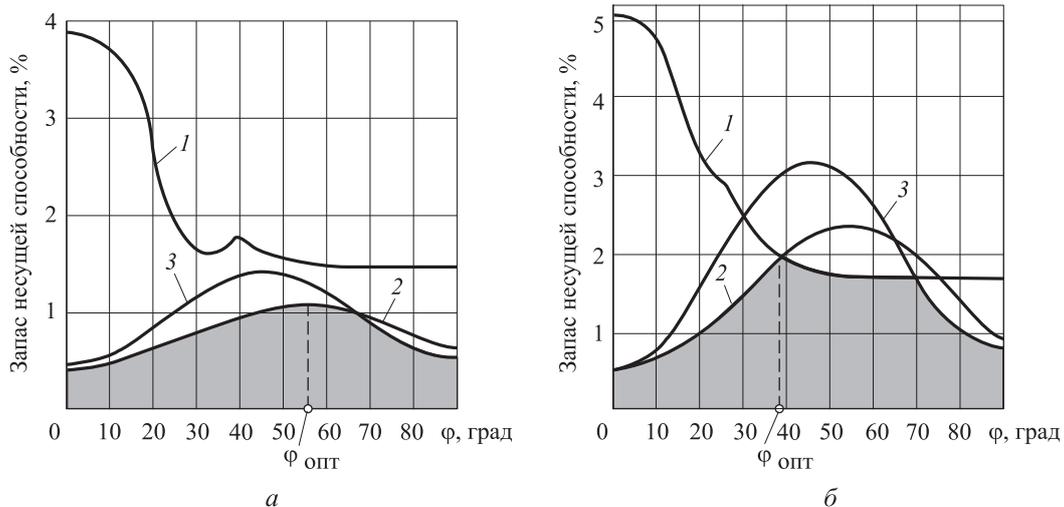


Рис. 3. Зависимость несущей способности многостеночной оболочки из низко модульного (а) и высоко модульного (б) материала от структуры армирования обшивок и стенок:

1 — запас прочности обшивок и стенок; 2 — запас общей устойчивости оболочки; 3 — запас местной устойчивости обшивок и стенок;  $\varphi_{\text{опт}}$  — оптимальное значение угла армирования для данных параметров оболочки

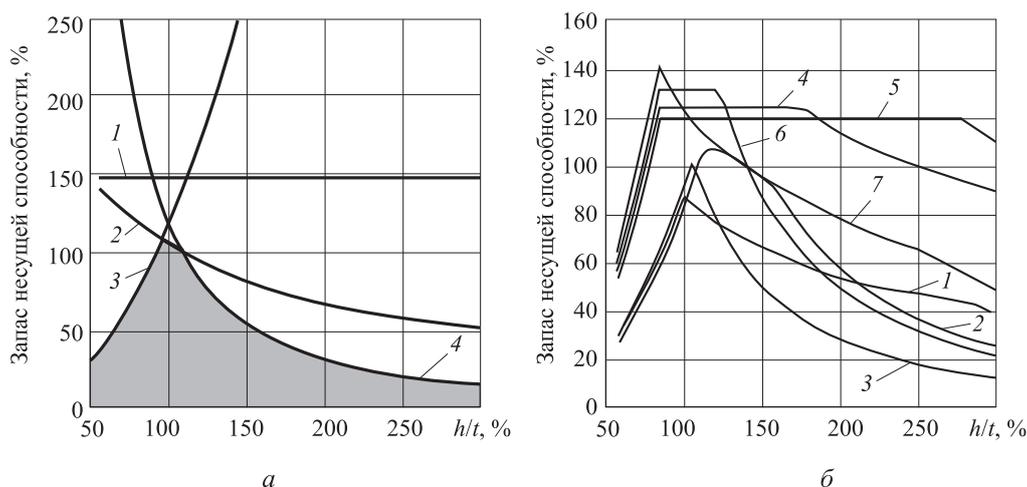


Рис. 4. Несущая способность многослойной оболочки для различных параметров обшивок и стенок:  
 а — различные механизмы исчерпания несущей способности при одинаковой структуре обшивок и стенок (1 — прочность обшивок и стенок; 2 — общая устойчивость; 3 — местная устойчивость обшивок; 4 — местная устойчивость стенок); б — несущая способность различных вариантов структур (1–3 — низко модульный материал; 4–7 — высоко модульный материал)

Следует обратить внимание на то, что использование в стенках структуры  $[\pm 45^\circ]$ , обычно рекомендуемой в авиационных конструкциях для восприятия сдвигов, во всех случаях приводит к понижению несущей способности. Это связано с тем, что для устойчивости данных конструкций прежде всего важно сопротивление сдвигу не в плоскости  $xz$ , а в плоскости  $yz$ , а, следовательно, в соответствии с (4) необходимо разворачивать материал в поперечном направлении. Действительно, для оболочки из низко модульного материала наилучшей оказывается структура  $[\pm 80^\circ]$ . Этот эффект проявляется и для высоко модульного материала, но в данном случае лимитирующим оказывается снижение прочности (горизонтальные полки на кривых 4–6). Наибольшую несущую способность оболочки из высоко модульного материала обеспечивает структура  $[\pm 30^\circ]$ , но и она уступает структуре  $[\pm 39^\circ/0^\circ/\pm 39^\circ]$ , отмеченной на рис. 3, б. Следует также отметить, что для всех рассмотренных структур наилучшие значения отношения  $h/t$  не на много отличаются от единицы.

Использование угловых вставок может повысить жесткость и устойчивость конструкции, однако может привести к снижению ее прочности. Так, при добавлении в базовую конструкцию из углепластика ЛУ-П/ЭНФБ вставок диаметром 0,75 мм из высоко модульного материала М60J/Ероху общая устойчивость повышается на 14 %, местная устойчивость — на 48 %, однако прочность уменьшается на 18 %. Это связано с тем, что жесткие вставки берут на себя нагрузку и разрушаются первыми.

Приведенные на рис. 3 и 4 результаты весьма показательны, однако они не могут заменить проведения полноценной оптимизации конструкции. Такая оптимизация проводилась для нескольких вариантов варьирования параметров многослойной оболочки. В качестве целевой функции во всех случаях использовался минимум массы конструкции, ограничения сводились к обеспечению заданной несущей способности при осевом сжатии. При варьировании толщин обшивок и стенок учитывалось, что они должны содержать целое число монослоев с толщиной 0,125 мм каждый. Оптимизация проводилась методом глобального перебора по сетке с шагом по параметрам  $h$  и  $t = 1$  мм, по толщинам — одному монослою, по углам —  $2...5^\circ$ . Общее число проб составляло 30 000–12 000 000.

Анализ различных постановок оптимизационной задачи показал следующее:

- при сохранении квадратной клетки и одинаковых структур обшивок и стенок возможности оптимизации ограничены. Так, для низко модульного материала вообще не удастся снизить массу базового варианта; для высоко модульного снижение массы составляет 33 %;
- при сохранении квадратной клетки и варьировании структур обшивок на классе  $[\pm\phi/0^\circ/\pm\phi]$  и стенок  $[\pm\psi]$  для низко модульного материала масса уменьшается на 11 %, для высоко модульного — на 39 %;
- при раздельном варьировании  $h$  и  $t$ , структур обшивок  $[\pm\phi/0^\circ/\pm\phi]$  и стенок  $[\pm\psi]$  для низко модульного материала весовой выигрыш

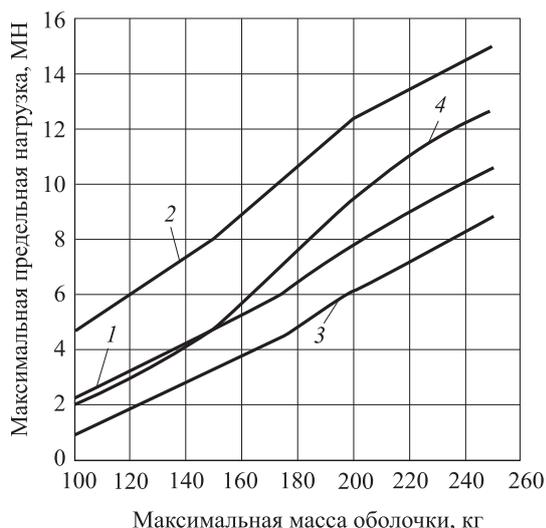


Рис. 5. Границы предельных возможностей при одновременной максимизации несущей способности и минимизации массы несущих оболочек:

- 1 — многостеночная оболочка из углепластика ЛУ-П/ЭНФБ; 2 — многостеночная оболочка из углепластика М60J/Ероху; 3 — трехслойная оболочка с обшивками из углепластика ЛУ-П/ЭНФБ; 4 — трехслойная оболочка с обшивками из углепластика М60J/Ероху

увеличивается до 12,5 %; для высокомодульного материала — до 43 %.

В заключение исследования были построены границы предельных возможностей [9, 12, 16] при минимизации массы оболочки и максимизации ее несущей способности (каждая точка

такой границы получена в ходе оптимизационного расчета). Результат показан на рис. 5, где для сравнения приведены аналогичные границы для трехслойных оболочек с сотовым наполнителем АМг-2Н 2,5/0,03 плотностью 55 кг/м<sup>3</sup> с учетом массы клея (300 г/м<sup>2</sup> на каждую обшивку).

## Выводы

1. Разработаны расчетные алгоритмы и программные средства для проектных расчетов композитных многостеночных оболочек.

2. Проведен расчетный анализ влияния различных факторов на несущую способность многостеночных оболочек. Показано, что оптимальные параметры сильно зависят от характеристик используемых материалов. Для низко модульных углепластиков предпочтительно близкое к поперечному армирование стенок.

3. На примере несущей оболочки отсека разгонного блока проведен анализ сравнительной эффективности оптимальных многостеночных оболочек и трехслойных оболочек с сотовым наполнителем. Установлено, что с учетом использования прогрессивных технологий конструктивная схема многостеночной оболочки является вполне конкурентоспособной для оболочечных конструкций ракетно-космической техники.

## Литература

- [1] Болтаев П.И., Зорин В.А. Методы расчета подкрепленных оболочек из композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*, 2011, № 2, с. 8–20.
- [2] Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники (Обзор). *Конструкции из композиционных материалов*, 2011, № 4, с. 44–59.
- [3] Смердов А.А., Думанский А.М., Таирова Л.П. Комплексные экспериментальные исследования деформативных и прочностных свойств композитов для отсеков и обтекателей ракет. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. Крупногабаритные трансформируемые космические конструкции и материалы для перспективных ракетно-космических систем*, 2012, с. 124–136.
- [4] Смердов А.А., Смердова О.А., Таирова Л.П., Цветков С.В., Тащилов С.В., Магнитский И.В. Экспериментальное исследование жесткостных и прочностных характеристик углепластика. *Конструкции из композиционных материалов*, 2009, № 3, с. 68–82.
- [5] Смердов А.А., Таирова Л.П., Баслык К.П., Артемьев А.В., Нелюб В.А., Бородулин А.С. Расчетно-экспериментальный анализ двух типов структур из углепластика для крупногабаритных ракетно-космических конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/859.html> (дата обращения 24 июня 2014).
- [6] Образцов И.Ф., Сироткин О.С., Литвинов В.Б. Интегральные конструкции из композиционных материалов и перспективы их применения. *Конструкции из композиционных материалов*, 2000, № 2, с. 78–84.

- [7] Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. *Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1984. 264 с.
- [8] Васильев В.В. *Механика конструкций из композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1988. 272 с.
- [9] Зиновьев П.А., Смердов А.А. *Оптимальное проектирование композитных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 103 с.
- [10] Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И. *Строительная механика ракет*. Москва, Высшая школа, 1984. 391 с.
- [11] Смердов А.А. *Оптимальное проектирование оболочек как задача математического программирования. Машиностроение: Энциклопедия; т. 1–3; в 2 кн.* Москва, Машиностроение, 1995, кн. 2, с. 233–240.
- [12] Zinoviev P.A., Smerdov A.A. *Optimal Design of Composite Bars for Space Truss Systems. Optimal Design. Theory and Applications to Materials and Structures*. Lancaster (USA), Technomic Publishing Co, 1999, pp. 277–314.
- [13] Алфутов Н.А. *Основы расчета на устойчивость упругих систем*. Москва, Машиностроение, 1991. 336 с.
- [14] Вольмир А.С. *Устойчивость деформируемых систем*. Москва, Наука, 1967. 984 с.
- [15] Лизин В.Т., Пяткин В.А. *Проектирование тонкостенных конструкций*. Москва, Машиностроение, 1976. 408 с.
- [16] Смердов А.А. *Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2008. 410 с.

## References

- [1] Boltaev P.I., Zorin V.A. *Metody rascheta podkreplennykh obolochek iz kompozitsionnykh materialov [Methods of analysis of stiffened shells from composite materials]. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [Design of composite materials]*. 2011, no. 2, pp. 8–20.
- [2] Zorin V.A. *Opyt primeneniia kompozitsionnykh materialov v izdeliakh aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki (Obzor) [Experience of composite application in articles of aviation, rocket and cosmic technics (review)]. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [Design of composite materials]*. 2011, no. 4, pp. 44–59.
- [3] Smerdov A.A., Dumanskii A.M., Tairova L.P. *Kompleksnye eksperimental'nye issledovaniia deformativnykh i prochnostnykh svoystv kompozitov dlia otsekov i obtekatelei raket [Comprehensive experimental studies deformability and strength properties of composites for compartments and fairings missiles]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. Spetsial'nyi vypusk Krupnogabaritnye transformiruemye kosmicheskie konstruktsii i materialy dlia perspektivnykh raketno-kosmicheskikh system [Special Issue Large transformable space structures and materials for advanced rocket and space systems]*. 2012, pp. 124–136.
- [4] Smerdov A.A., Smerdova O.A., Tairova L.P., Tsvetkov S.V., Tashchilov S.V., Magnitskii I.V. *Eksperimental'noe issledovanie zhestkostnykh i prochnostnykh kharakteristik ugleplastika [Experimental investigation of rigid and strength characteristics of carbon-fiber filled composite material]. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [Design of composite materials]*. 2009, no. 3, pp. 68–82.
- [5] Smerdov A.A., Tairova L.P., Baslyk K.P., Artem'ev A.V., Neliub V.A., Borodulin A.S. *Raschetno-eksperimental'nyi analiz dvukh tipov struktur iz ugleplastika dlia krupnogabaritnykh raketno-kosmicheskikh konstruktsii [Experiment-calculated analysis of two types of CFRP structures for large size rocket-space structures]. Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii [Engineering Journal: Science and Innovations]*. 2013, no. 7. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/859.html> (accessed 24 June 2014).
- [6] Obraztsov I.F., Sirotkin O.S., Litvinov V.B. *Integral'nye konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov i perspektivy ikh primeneniia [Integral constructions from composite materials and prospects of their application]. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [Constructions from composite materials]*. 2000, no. 2, pp. 78–84.

- [7] Alfutov N.A., Zinov'ev P.A., Popov B.G. *Raschet mnogosloynnykh plastin i obolochek iz kompozitsionnykh materialov* [Calculation of laminated plates and shells made of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1984. 264 p.
- [8] Vasil'ev V.V. *Mekhanika konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of structures from composite materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 272 p.
- [9] Zinov'ev P.A., Smerdov A.A. *Optimal'noe proektirovanie kompozitnykh materialov* [Optimal design of composite materials]. Moscow, Bauman Press, 2006. 103 p.
- [10] Balabukh L.I., Alfutov N.A., Usiukin V.I. *Stroitel'naia mekhanika raket* [Construction mechanics missiles]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1984. 391 p.
- [11] Smerdov A.A. *Optimal'noe proektirovanie obolochek kak zadacha matematicheskogo programmirovaniia. Mashinostroenie: Entsiklopediia* [Optimal design of shells as a mathematical programming problem. Mechanical Engineering: Encyclopedia]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1995, vol. 1–3, book 2, pp. 233–240.
- [12] Zinoviev P.A., Smerdov A.A. *Optimal Design of Composite Bars for Space Truss Systems. Optimal Design. Theory and Applications to Materials and Structures*. Lancaster (USA), Technomic Publishing Co, 1999, pp. 277–314.
- [13] Alfutov N.A. *Osnovy rascheta na ustoichivost' uprugikh system* [Bases of calculation on stability of elastic systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1991. 336 p.
- [14] Vol'mir A.S. *Ustoichivost' deformiruemykh system* [Stability of deformable systems]. Moscow, Nauka publ., 1967. 984 p.
- [15] Lizin V.T., Piatkin V.A. *Proektirovanie tonkostennykh konstruksii* [Design of thin-walled structures]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1976. 408 p.
- [16] Smerdov A.A. *Razrabotka metodov proektirovaniia kompozitnykh materialov i konstruksii raketno-kosmicheskoi tekhniki*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of methods for the design of composite materials and structures rocket and space technology. Dr. tech. sci. diss.]. 2008. 410 p.

Статья поступила в редакцию 30.06.2014

## Информация об авторах

**СМЕРДОВ Андрей Анатольевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: asmerdov@mail.ru).

**Фан Тхе Шон** (Москва) — аспирант кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Phantheson80@yahoo.com).

## Information about the authors

**SMERDOV Andrey Anatol'evich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Spacecrafts and Launch Vehicles» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: asmerdov@mail.ru).

**Fan Tkhe Shon** (Moscow) — Post-Graduate of «Spacecrafts and Launch Vehicles» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: Phantheson80@yahoo.com)