

УДК 621.763

АНИЗОГРИДНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ СЕТЧАТЫЕ КОНСТРУКЦИИ – РАЗРАБОТКА И ПРИЛОЖЕНИЕ К КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

В.В. Васильев¹, В.А. Барынин¹, А.Ф. Разин¹, С.А. Петроковский², В.И. Халиманович³

¹Центральный НИИ специального машиностроения (Россия)

²Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева

³ОАО «Информационные спутниковые системы им. М.Ф. Решетнева»

Статья представляет собой обзор российского опыта разработки и приложения в космической технике анизогридных (Anisogrid – анизотропная сетка) композитных сетчатых конструкций, изготавливаемых в Центральном научно-исследовательском институте специального машиностроения (ЦНИИСМ). Обсуждаются традиционные стрингерные, трёхслойные и сетчатые конструктивно-технологические концепции: анализ, проектирование, изготовление сетчатых конструкций, их весовая и экономическая эффективность. Статья иллюстрируется многочисленными примерами реальных сетчатых конструкций – переходных отсеков диаметром более 4 м, адаптеров полезной нагрузки, корпусов спутников и стержневых элементов космических аппаратов длиной до 10 м.

Ключевые слова: композиты, сетчатые конструкции, анализ, проектирование, изготовление.

ANISOGRID COMPOSITE LATTICE STRUCTURES – DEVELOPMENT AND SPACE APPLICATIONS

V.V. Vasiliev¹, V.A. Barynin¹, A.F. Razin¹, S.A. Petrokovskii², V.I. Khalimanovich³

¹Central Research Institute of Special Machinery, Khotkovo, Moscow Region 141371, Russia

²Khrunichev Space Center, Moscow 121309, Russia

³Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk 662972, Russia

The paper is an overview of Russian experience in development and space applications of Anisogrid composite lattice structures manufactured in the Central Research Institute of Special Machinery (CRISM). The paper contains comparison of traditional stringer-stiffened and sandwich structures with Anisogrid design concept, analysis, design and fabrication of lattice structures along with weight and cost evaluation. The paper is illustrated with numerous examples demonstrating development of full scale Anisogrid structures – interstage structures with diameter about 4 m, payload attach fittings (adapters), spacecraft bodies and structural elements with length up to 10 m.

Keywords: composite material, lattice structure, analysis, design, fabrication.

1. Сравнение основных конструктивно-технологических концепций

В настоящее время в ракетно-космической технике существуют три основные конструктивно-технологические концепции – подкреплённая, трёхслойная и сетчатая конструкции. Принципи-

альная особенность первых двух концепций заключается в том, что нагрузка в основном воспринимается обшивкой, а рёбра или наполнитель обеспечивают изгибную жёсткость и сопротивляемость потере устойчивости. При этом в композитных конструкциях такого рода ни обшивка, ни рёбра не являются однонаправленными, что значительно снижает эффективные характеристики композитного материала. В сетчатых конструкциях типа показанной на рис. 1 основными несущими элементами являются рёбра, которые обеспечивают одновременно мембранную и изгибную жёсткость конструкции и изготавливаются из однонаправленного углепластика, обладающего высокой удельной жёсткостью и прочностью. В настоящее время рёбра сетчатых конструкций, изготовленных в промышленных условиях из композита на основе волокон среднего класса ($E_1 = 140$ ГПа, $\bar{\sigma}_1^+ = 2100$ МПа, $\bar{\sigma}_1^- = 1500$ МПа, $\rho = 1550$ кг/м³), обладают модулем упругости $E_p = 90$ ГПа, пределом прочности при растяжении и сжатии $\bar{\sigma}_p^+ = 1350$ МПа и $\bar{\sigma}_p^- = 650$ МПа при плотности $\rho = 1450$ кг/м³. Заметим, что объёмное содержание волокон в рёбрах примерно в 1,5 раза меньше, чем в традиционном композитном материале. Для высокомодульных углепластиков ($E_1 = 220$ ГПа) модуль упругости рёбер составляет 185 ГПа, т.е. приближается к модулю стали при плотности в 5,2 раза меньшей. Такие характеристики обеспечивают исключительно высокую весовую эффективность сетчатых конструкций. Ещё одна особенность сетчатой конструкции определяет её высокую сопротивляемость потере устойчивости. Как известно, экспериментальная критическая нагрузка для сжатой подкреплённой цилиндрической оболочки оказывается значительно меньше расчётной. Причина этого эффекта связана с начальными несовершенствами формы поверхности оболочки. Сетчатые оболочки, в отличие от традиционных подкреплённых, обладают свойством самостабилизации – при осевом сжатии спиральные рёбра растягивают кольцевые так, что сечение автоматически принимает круговую форму, и экспериментальная критическая нагрузка оказывается на уровне расчётной.

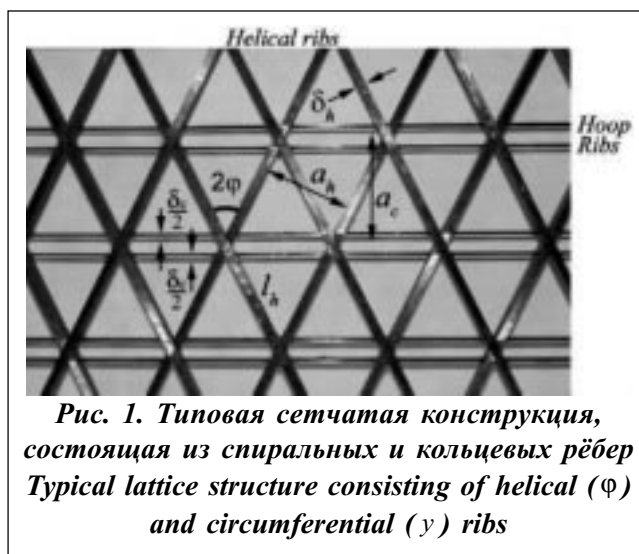


Рис. 1. Типовая сетчатая конструкция, состоящая из спиральных и кольцевых рёбер
Typical lattice structure consisting of helical (ϕ) and circumferential (y) ribs

В настоящее время рёбра сетчатых конструкций, изготовленных в промышленных условиях из композита на основе волокон среднего класса ($E_1 = 140$ ГПа, $\bar{\sigma}_1^+ = 2100$ МПа, $\bar{\sigma}_1^- = 1500$ МПа, $\rho = 1550$ кг/м³), обладают модулем упругости $E_p = 90$ ГПа, пределом прочности при растяжении и сжатии $\bar{\sigma}_p^+ = 1350$ МПа и $\bar{\sigma}_p^- = 650$ МПа при плотности $\rho = 1450$ кг/м³. Заметим, что объёмное содержание волокон в рёбрах примерно в 1,5 раза меньше, чем в традиционном композитном материале. Для высокомодульных углепластиков ($E_1 = 220$ ГПа) модуль упругости рёбер составляет 185 ГПа, т.е. приближается к модулю стали при плотности в 5,2 раза меньшей. Такие характеристики обеспечивают исключительно высокую весовую эффективность сетчатых конструкций. Ещё одна особенность сетчатой конструкции определяет её высокую сопротивляемость потере устойчивости. Как известно, экспериментальная критическая нагрузка для сжатой подкреплённой цилиндрической оболочки оказывается значительно меньше расчётной. Причина этого эффекта связана с начальными несовершенствами формы поверхности оболочки. Сетчатые оболочки, в отличие от традиционных подкреплённых, обладают свойством самостабилизации – при осевом сжатии спиральные рёбра растягивают кольцевые так, что сечение автоматически принимает круговую форму, и экспериментальная критическая нагрузка оказывается на уровне расчётной.

2. Анализ и проектирование сетчатых конструкций

Сетчатые конструкции описываются традиционной системой уравнений теории композитных оболочек [4]. Конструктивные особенности сетчатых оболочек проявляются только в соотношениях упругости, которые имеют следующую форму:

$$N_x = B_{11}\epsilon_x + B_{12}\epsilon_y; N_y = B_{21}\epsilon_x + B_{22}\epsilon_y; N_{xy} = B_{33}\epsilon_{xy}; M_x = D_{11}k_x + D_{12}k_y; M_y = D_{21}k_x + D_{22}k_y; M_{xy} = D_{33}k_{xy}. \quad (1)$$

Здесь x и y – меридиональная и кольцевая координаты оболочки вращения; N и M – усилия и моменты в соответствующих направлениях; ϵ и k – компоненты мембранных деформаций и изменения кривизны оболочки. В уравнения (1) входят мембранные (B) и изгибные (D) коэффициенты

жёсткости, которые для системы спиральных продольных и кольцевых рёбер прямоугольного сечения, имеющих высоту h и толщину δ , связаны следующим образом:

$$D_{mn} = \frac{h^2}{12} B_{mn},$$

$$\text{где } B_{11} = B_\varphi \cos^4 \varphi + B_x; B_{22} = B_\varphi \sin^4 \varphi + B_y; B_{12} = B_{21} = B_{33} = B_\varphi \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi; \quad (2)$$

$$B_\varphi = E_\varphi h \bar{\delta}_\varphi; B_x = E_x h \bar{\delta}_x; B_y = E_y h \bar{\delta}_y; \quad (3)$$

$$\bar{\delta}_\varphi = \frac{\delta_\varphi}{a_\varphi}; \bar{\delta}_x = \frac{\delta_x}{a_x}; \bar{\delta}_y = \frac{\delta_y}{a_y}. \quad (4)$$

В соотношениях (2)–(4) индекс φ соответствует спиральным рёбрам, x – осевым, y – кольцевым, a – расстояние между рёбрами (по нормали к их осям), E – модуль упругости рёбер.

На основе полученных соотношений строятся континуальные модели, в которых рёбра осредняются по поверхности конструкции (рис. 2,а), и дискретные конечно-элементные модели, состоящие из балочных элементов (рис. 2,б).

Проектирование сетчатых цилиндрических оболочек, нагруженных осевой сжимающей силой, осуществляется тремя основными методами:

- ▼ методом геометрического программирования [5];
- ▼ методом минимизации коэффициентов безопасности, соответствующим различным формам разрушения [6];
- ▼ численным методом [7, 8].

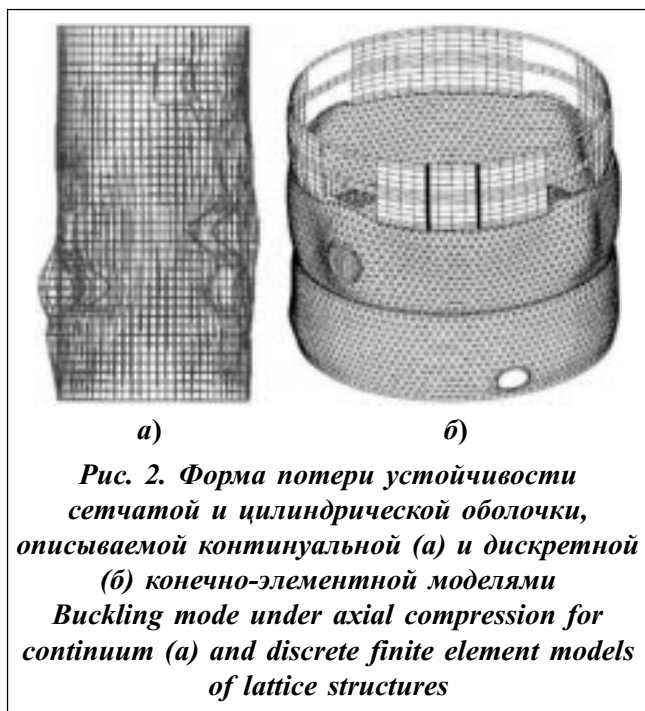


Рис. 2. Форма потери устойчивости сетчатой и цилиндрической оболочки, описываемой континуальной (а) и дискретной (б) конечно-элементной моделями
Buckling mode under axial compression for continuum (a) and discrete finite element models of lattice structures

Согласно второму из этих методов, цилиндрическая оболочка диаметром D и длиной L проектируется на действие эквивалентной сжимающей силы:

$$P = F + \frac{4M}{D},$$

где F – действующая осевая сжимающая сила; M – изгибающий момент.

Масса оболочки, состоящей из системы спиральных и кольцевых рёбер:

$$m = \pi D L h \rho (2\bar{\delta}_\varphi + \bar{\delta}_y), \quad (5)$$

где h – толщина оболочки; ρ – плотность материала рёбер.

Масса конструкции (5) минимизируется по проектным параметрам:

⇨ толщине оболочки h ;

⇨ относительной толщине спиральных и кольцевых рёбер $\bar{\delta}_\varphi$ и $\bar{\delta}_y$, определяемых равенствами (4);

⇨ углу наклона спиральных рёбер φ (см. рис. 1).

При этом вводятся три коэффициента безопасности по возможным формам разрушения конструкции, т.е.:

➤ разрушение спиральных рёбер – n_s ;

➤ общая потеря устойчивости оболочки – n_g ;

➤ местная потеря устойчивости элементов спиральных рёбер между узловыми точками – n_l .

С помощью этих коэффициентов ограничения по прочности и устойчивости, имеющие форму неравенств, преобразуются в равенства, проектные параметры из них выражаются через коэффициенты безопасности n_s , n_g и n_l , которые должны быть не меньше единицы. Результаты минимизации массы (5) зависят от величины параметра нагрузки:

$$p = \frac{4P}{\pi D^2}.$$

При

$$\rho \leq \rho_s = \frac{48\bar{\sigma}^{-2}}{\pi E} \sqrt{\frac{\bar{\sigma}}{kE}}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости рёбер; $\bar{\sigma}$ – предел прочности спиральных рёбер при сжатии; k – коэффициент местной потери устойчивости, который для структуры, показанной на рис. 1, равен 1,15, активными являются ограничения по устойчивости ($n_g = n_l = 1$), а условие прочности рёбер выполняется с запасом:

$$n_s = 4\bar{\sigma} \left(\frac{9}{4\pi^2 p^2 k E^3} \right)^{1/5}.$$

При этом проектные параметры

$$h = \frac{D}{4} \left(\frac{48\pi^4}{E^4} k^2 p^4 \right)^{1/10}; \quad \text{tg}\varphi = \frac{1}{2};$$

$$\bar{\delta}_\varphi = \frac{5}{4\pi} \left(\frac{108\pi^2 p^2}{E^2 k^4} \right)^{1/10}; \quad \bar{\delta}_y = \frac{\bar{\delta}_\varphi}{2}.$$

При более высокой нагрузке, т.е. при $p > p_s$, где p_s определяется равенством (6), активными являются все три ограничения ($n_s = n_g = n_l = 1$), и проектные параметры имеют вид:

$$h = \frac{D}{4} \left(\frac{\pi^2 k p^2}{E \bar{\sigma}} \right)^{1/4}; \quad \text{tg}\varphi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{p_s}{p}};$$

$$\bar{\delta}_\varphi = \frac{2}{\pi \sin 2\varphi} \sqrt{\frac{3\bar{\sigma}}{kE}}; \quad \bar{\delta}_y = \frac{p_s \bar{\delta}_\varphi}{2p}.$$

3. Изготовление сетчатых конструкций

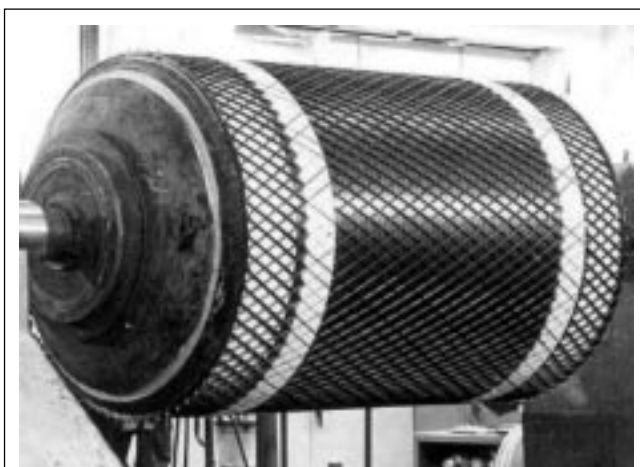
Изготовление сетчатых конструкций, начало которого относится к 1980 г., осуществлялось на первом этапе методом свободной намотки, согласно которому при намотке спиральных рёбер лента укладывалась одна на другую (в отличие от традиционного способа, при котором последующая лента укладывается рядом с предыдущей), а обшивку получали кольцевой намоткой. Свободная намотка рёбер показана на рис. 3. Несмотря на высокую весовую эффективность конструкции, качество поверхностей рёбер, полученных свободной намоткой, оказалось невысоким.

В дальнейшем процесс был усовершенствован, и намотка рёбер осуществлялась в пазы, прорезанные в пенопласте, которым покрывалась оправка. В настоящее время процесс применяется для изготовления трёхслойных сетчатых конструкций с двумя слоями – наружным и внутренним, между которыми располагаются спиральные рёбра и пенопласт. При этом на оправку наматывается внутренний слой, напыляется пенопласт, прорезаются канавки для рёбер, наматываются рёбра и наружный слой. Процесс намотки на оправку, покрытую пенопластом, показан на рис. 4.

Наиболее распространённым процессом, используемым в настоящее время для изготовления сетчатых конструкций без обшивки или с наружной обшивкой, является намотка рёбер в пазы эластичных матриц из силиконовой резины, которыми покрывается оправка. На рис. 5 показана намотка двух адаптеров полезной нагрузки для ракеты-носителя (РН) «Протон-М». После отверждения композита оболочка разрезается по экватору, вынимается оправка и эластичные матрицы вытягиваются внутрь оболочки. Затем адаптер протачивается по наружной поверхности (рис. 6). Эта операция позволяет получить заданные изменения толщины сетчатого слоя по образующей. Для некоторых конструкций в качестве элемента, формирующего рёбра, может быть использована тонкая металлическая оболочка (лейнер) с канавками типа показанной на рис. 7.

4. Сетчатые конструкции в ракете-носителе «Протон-М»

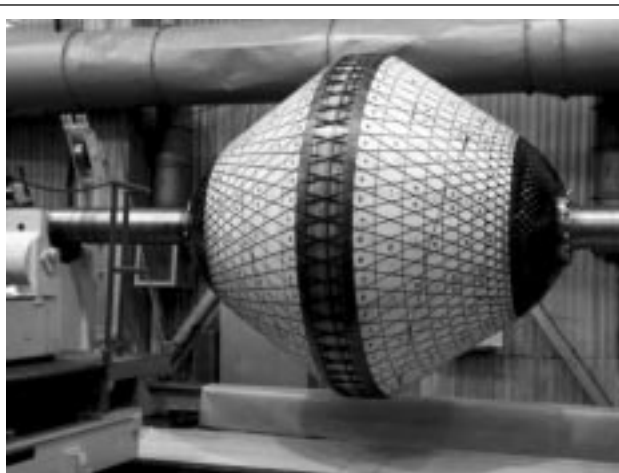
Наиболее широкое применение сетчатые конструкции нашли в ракете-носителе «Протон» (рис. 8). В июле 2005 г. исполнилось 40 лет со дня первого старта двухступенчатого варианта ракеты-носителя «Протон». С 1967 г. начались запуски ракеты в её современном виде – в 3- и 4-ступенчатых вариантах.



*Рис. 3. Свободная намотка спиральных рёбер (1980)
Free winding of helical ribs (1980)*



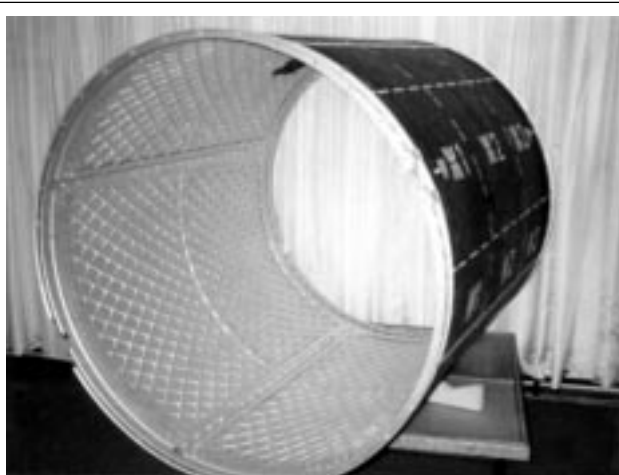
*Рис. 4. Намотка на оправку, покрытую пенопластом (1985)
Winding on the mandrel with foam coating (1985)*



*Рис. 5. Намотка адаптеров
полезной нагрузки*
Winding of lattice adapters



*Рис. 6. Обработка наружной
поверхности адаптера*
Machining of the adapter outer surface



*Рис. 7. Сетчатая конструкция с
алюминиевым лайнером*
**Composite lattice structure
with an aluminum liner**



Рис. 8. РН «Протон-М»
Proton-M space launcher

Относительная простота конструкции, высокая стабильность производства и большой опыт лётной эксплуатации сделали ракету «Протон» одним из самых надёжных носителей в мире. В настоящее время РН «Протон» является транспортной основой Государственной космической программы России, активно используется в коммерческой деятельности по выведению на орбиту спутников иностранного производства. За время эксплуатации осуществлено более 300 пусков. С помощью РН «Протон» в космос выведены спутники «Космос», «Экран», «Радуга», «Горизонт», спутники для исследования Луны, Марса, Венеры, кометы Галлея, пилотируемые орбитальные станции «Салют» и «Мир» и входящие в их состав тяжелые специализированные модули «Квант», «Квант-2», «Кристалл», «Спектр», «Природа», модули для международной космической станции.

В настоящее время эксплуатируется модификация носителя «Протон-М» с увеличенными энергомассовыми характеристиками. Для этого был предпринят целый ряд мероприятий, в том числе и по снижению массы конструкции. В числе элементов, подвергшихся существенному облегчению, – переходная система, верхняя и нижняя проставки второй ступени. Эти составляющие носителя было решено проектировать и изготавливать из углепластика, при этом за тип конструкции была принята прогрессивная сетчатая конструкция. Именно сетчатая конструкция позволила получить максимальную весовую отдачу по сравнению со всеми известными типами конструкций [9]. Композитные сетчатые конструкции носителя «Протон-М» показаны на рис. 9.

4.1. Адаптер полезной нагрузки

Наиболее эффективным в весовом отношении является переходной отсек (адаптер), предназначенный для обеспечения механического интерфейса между ракетой-носителем и космическим аппаратом. Корпус адаптера является высоконагруженной несущей конструкцией, обладающей значительной жёсткостью. Нижний (по полёту) шпангоут обеспечивает стык с последней ступенью носителя. По верхнему (по полёту) шпангоуту выполняется стыковка с космическим аппаратом.

Традиционная конструкция адаптера состоит из гладкой или подкреплённой конической оболочки и стыковочных шпангоутов из алюминиевого сплава (рис. 10,а). В связи с тем, что снижение массы адаптера позволяет соответственно увеличить массу выводимой на орбиту полезной нагрузки, проблема его оптимального конструктивного облика имеет принципиальное значение и неоднократно обсуждалась в литературе. В частности, в настоящее время считается перспективной трёхслойная конструкция с несущими слоями из углепластика и сотовым наполнителем, изготавливаемая методом выкладки. Однако невысокие технологичность и надёжность такой конструкции, чувствительной к расслоениям, вызывает необходимость в дальнейшем поиске.

Сетчатый адаптер носителя «Протон-М» показан на рис. 10,б. Адаптер изготавливается методом намотки ленты из углеродных жгутов, пропитанных эпоксидным связующим, на коническую оправку, покрытую слоем эластичного материала с пазами для формирования рёбер (см. рис. 5), и имеет следующие характеристики:

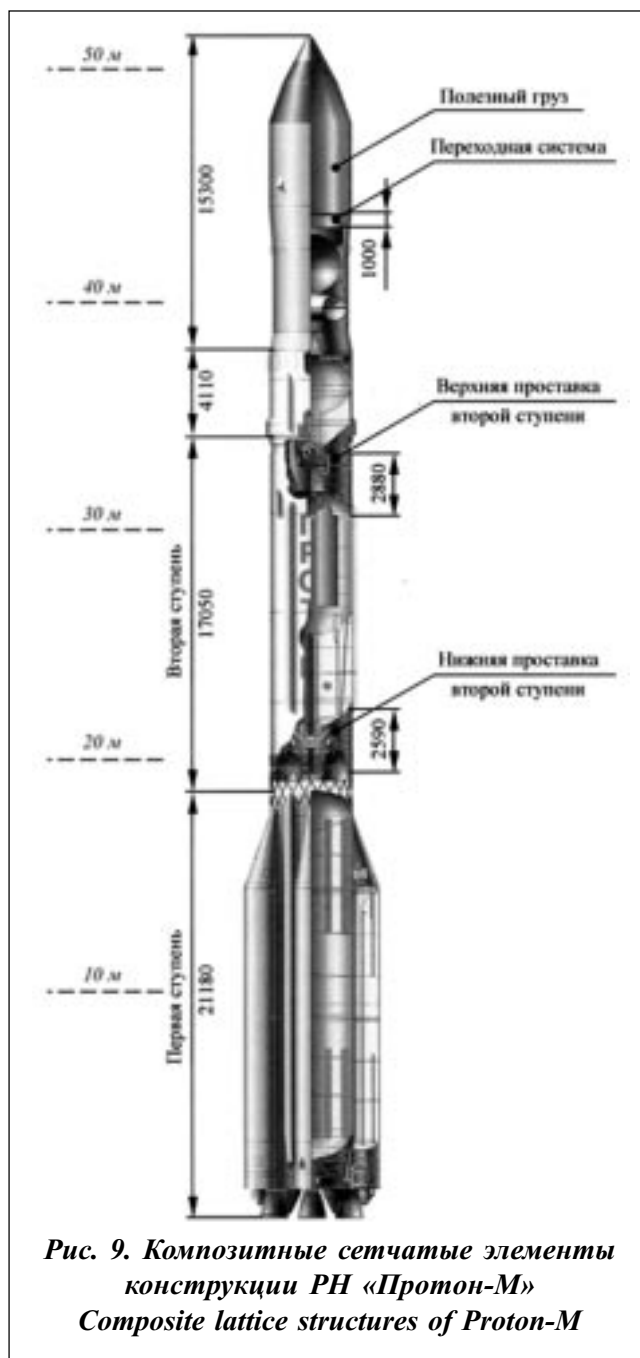
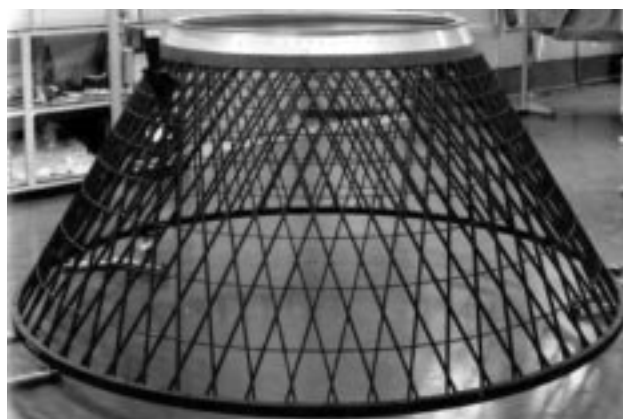


Рис. 9. Композитные сетчатые элементы конструкции РН «Протон-М»
Composite lattice structures of Proton-M



а)



б)

Рис. 10. Металлический (а) и сетчатый композитный (б) адаптеры
Metal (a) and Anisogrid (b) payload adapters

- диаметр нижнего основания 2500 мм;
- диаметр верхнего основания 1300 мм;
- высота 900 мм;
- экспериментальная эквивалентная сжимающая сила 2,1 МН;
- экспериментальная осевая жёсткость 440 кН/мм.

Масса сетчатого адаптера на 60% меньше массы конструкции из алюминиевого сплава, а стоимость на 30% меньше. В процессе испытаний, показанных на рис. 11, адаптер разрушился при изгибающей нагрузке, эквивалентной осевой сжимающей силе 2,1 МН, которая соответствовала нагрузке, полученной методом конечных элементов (рис. 12).

В июне 2004 г. носитель «Протон-М», стартовавший в 303-й раз с адаптером, показанным на рис. 10,б, вывел на орбиту спутник «Интелсат-10» с рекордной для РН «Протон-М» массой 5575 кг. К настоящему времени осуществлено 18 успешных запусков РН «Протон-М» с адаптером, показанным на рис. 10,б.

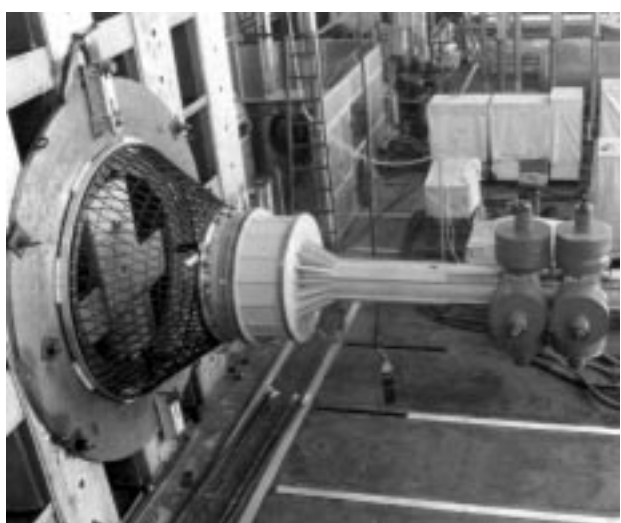
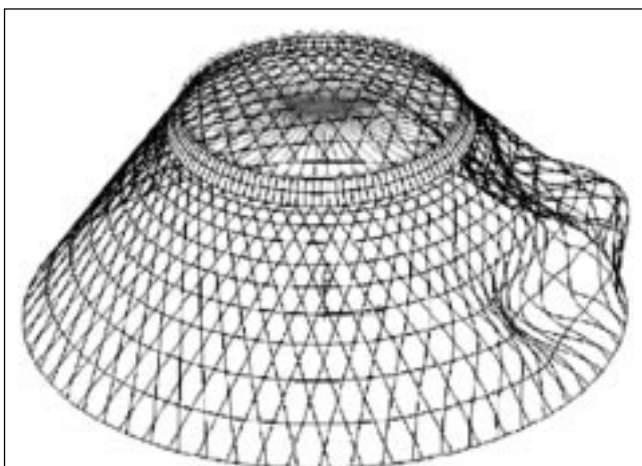
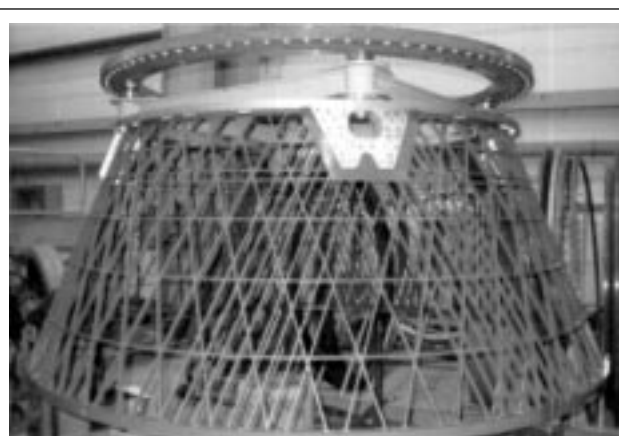


Рис. 11. Динамические испытания адаптера
Dynamic testing of Anisogrid adapter

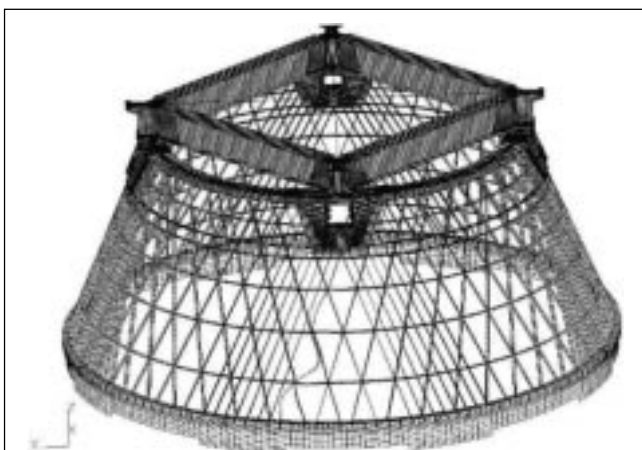
ЦНИИСМ изготавливает серию адаптеров для различных космических программ. На рис. 13 показан сетчатый композитный адаптер для космического аппарата с четырьмя узлами разделения. Адаптер имеет нерегулярную структуру, более плотную в окрестности узлов разделения. Такая структура для показанного на рис. 13 адаптера имеет весовую эффективность, которая вдвое превышает эффективность регулярной структуры, показанной на рис. 10,б (для адаптера с четырьмя узлами разделения). Конечно-элементная модель адаптера, имеющая 10^6 степеней свободы, показана на рис. 14, а испытание на осевое сжатие – на рис. 15. Точность расчётного предсказания жёсткости составляет 7%, а точность предсказания несущей способности – 9%.



*Рис. 12. Форма потери устойчивости адаптера при изгибе
Buckling mode of the adapter under bending*



*Рис. 13. Сетчатый композитный адаптер с четырьмя узлами разделения
Anisogrid adapter with four separation joints*



*Рис. 14. Конечно-элементная модель адаптера
Finite-element model of the adapter*



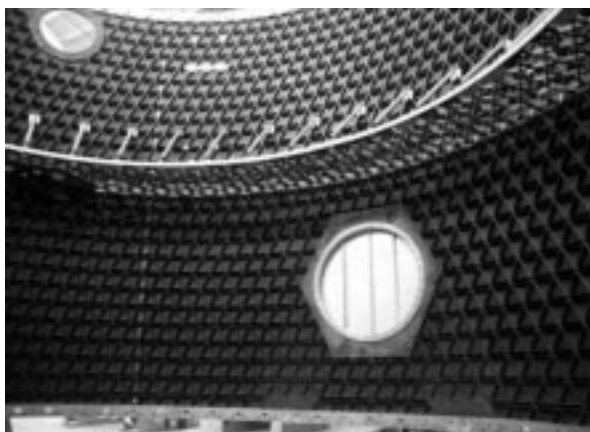
*Рис. 15. Испытания адаптера
Testing of the adapter*

4.2. Переходные отсеки второй ступени

Вторая ступень РН «Протон-М», имеющая длину 17 м, расположена между переходной фермой (см. рис. 9) и двигателем 3-й ступени и имеет два переходных отсека – верхний и нижний. Диаметр отсеков 4100 мм, длина – около 3000 мм.

Верхний отсек сетчатой конструкции (рис. 16) состоит из системы рёбер из углепластика и обшивки из органопластика. Расчётное значение эквивалентной осевой сжимающей силы, на которую спроектирован верхний переходной отсек, составляет 7,5 МН. Конечно-элементная модель верхнего отсека показана на рис. 2,б. В средней части отсека имеется шпангоут сетчатой конструкции (рис. 17), предназначенный для крепления ракеты при транспортировке и подъёме в стартовое положение. Экономия массы сетчатого верхнего отсека по отношению к алюминиевому стрингерному прототипу составляет 20%. Первый полёт РН «Протон-М» с композитным верхним отсеком состоялся в декабре 2006 г. К настоящему времени осуществлено пять успешных запусков РН «Протон-М» с сетчатым верхним отсеком.

Нижний переходной отсек (см. рис. 9) является высоконагруженной конструкцией. Расчётная эквивалентная осевая сжимающая сила составляет 12 МН. Процесс намотки и конструкция компо-



а)
Рис. 16. Внутренний (а) и общий (б) виды верхнего отсека
Internal (a) and external (b) views of the upper interstage



Рис. 17. Сетчатый шпангоут
верхнего отсека
Lattice ring of the upper interstage

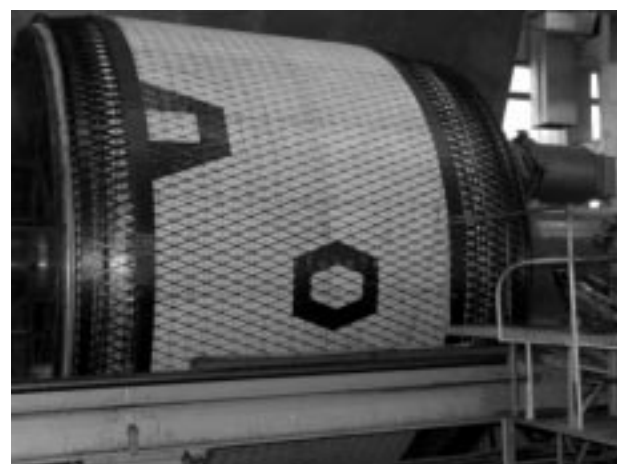


Рис. 18. Намотка нижнего отсека
Winding of the lower interstage

зитного сетчатого нижнего отсека показаны на рис. 18 и рис. 19. Экономия массы сетчатого нижнего отсека по отношению к алюминиевому стрингерному прототипу составляет 38%. Первый полёт РН «Протон-М» с композитным нижним отсеком состоялся в июне 2007 г. К настоящему времени осуществлено четыре успешных запуска.

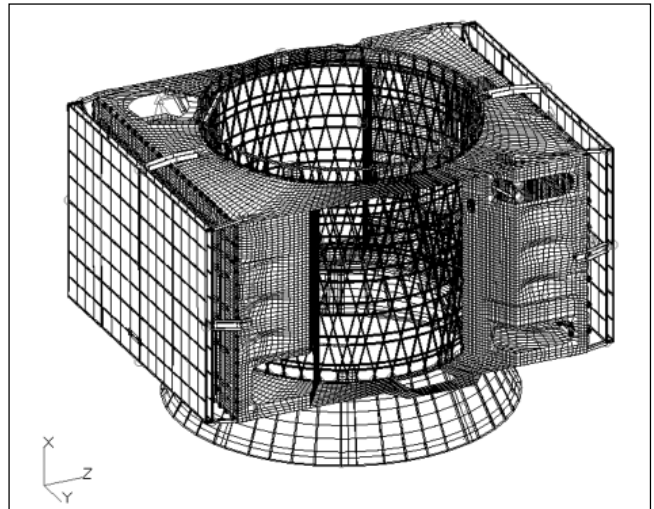
Применение композитных сетчатых отсеков в конструкции РН «Протон-М», кроме существенного снижения массы ракеты, дало значительный экономический эффект в пересчёте на массу груза, выводимого на переходную орбиту, что особо важно при запусках коммерческих космических аппаратов.



Рис. 19. Нижний отсек
Anisogrid lower interstage



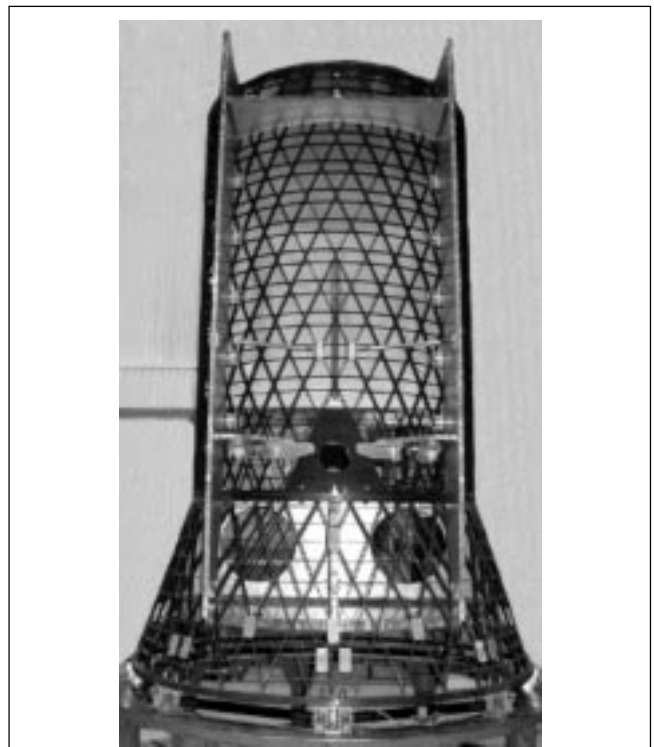
*Рис. 20. Корпус космического аппарата «Экспресс-2000»
The body of Express-2000 spacecraft*



*Рис. 21. Конечно-элементная модель космического аппарата «Экспресс-МД»
Finite-element model of Express-MD spacecraft*



*Рис. 22. Корпус космического аппарата «Экспресс-МД»
The body of Express-MD spacecraft*

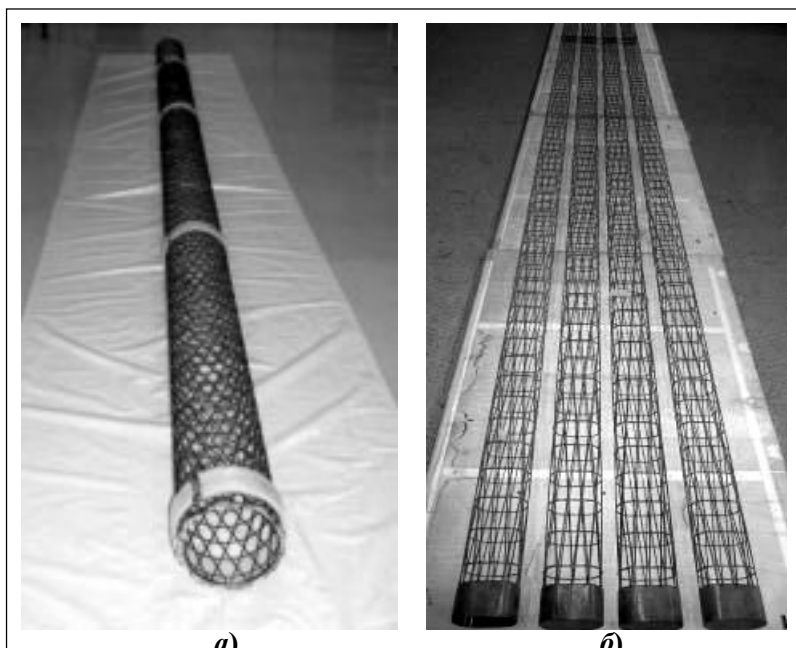


*Рис. 23. Корпус космического аппарата «Экспресс»
Assembled body of Express spacecraft*

5. Сетчатые конструкции космических аппаратов

В отношении использования анизотридных сетчатых композитных конструкций космические конструкции могут быть разделены на два класса.

К первому классу относятся конструкции типа корпуса космического аппарата, на который в процессе выведения на орбиту действуют значительные нагрузки и который должен удовлетворять требованиям по прочности и жёсткости при минимальной массе. Сетчатые конструкции, обладающие, как уже отмечалось, высокой удельной



а) б)
Рис. 24. Сетчатые стержневые элементы
кругового (а) и некругового (б) сечений
*Anisogrid lattice beams with circular (a) and
non-circular (b) cross section*



Рис. 25. Конструкция из сетчатых
композитных стержней
*Space structure assembled of Anisogrid
composite beams*

(по отношению к плотности) прочностью и жёсткостью, находят в настоящее время всё более широкое применение в конструкциях такого рода. В частности, на рис. 20 показана конструкция корпуса космического аппарата «Экспресс-2000». На рис. 21 показаны конечно-элементная модель космического аппарата «Экспресс-МД», а на рис. 22 – корпус этого аппарата. Монолитные участки корпуса (рис. 22) обеспечивают соединение с оборудованием, устанавливаемым на корпус (см. рис. 21). На рис. 23 показан сетчатый корпус космического аппарата типа «Экспресс».

Ко второму классу космических конструкций относятся элементы ферменных конструкций, которые не испытывают значительных на-

грузок ни при выводе на орбиту, ни в процессе эксплуатации в космосе. Такие конструкции должны обладать необходимой жёсткостью и минимальной массой. Применительно к элементам этого типа сетчатые конструкции обладают принципиальным преимуществом по сравнению с традиционными гладкими и подкреплёнными конструкциями, толщина оболочки которых, а следовательно, и масса, в силу технологических ограничений не могут быть достаточно малыми даже при отсутствии ограничений по прочности и жёсткости конструкции. Масса сетчатой конструкции определяется её эффективной толщиной, т.е. отношением площади сечения рёбер к расстоянию между ними, и может достигать минимального расчётного значения, которое практически всегда может быть технологически реализовано в композитной конструкции методом намотки. На рис. 24 и рис. 25 показаны сетчатые стержневые элементы кругового и некругового сечений длиной до 10 м, а на рис. 25 – конструкция, состоящая из сетчатых композитных стержней.

Библиографический список

1. Barynin V.A., Bunakov V.A., Razin A.F., Vasiliev V.V. Aerospace Composite Lattice Structures. Proc. / Of the 12-th Int. Conf. on Composite Materials. Paris, France, 1999 (CD).
2. Vasiliev V.V., Barynin V.A., Razin A.F. Anisogrid Lattice Structures – Survey of Development and Application // Composite Structures. 2001. 54. P. 361–370.
3. Vasiliev V.V., Razin A.F. Anisogrid Composite Lattice Structures for Spacecraft and Aircraft Applications // Composite Structures. 2006. 76. P. 182–189.
4. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988.
5. Bunakov V.A. Design of Axially Compressed Composite Cylindrical Shells with Lattice Stiffeners / In: Optimal Structural Design / Editors V.V.Vasiliev and Z.Gurdal // Technomic. 1999. P. 207–246.
6. Vasiliev V.V., Razin A.F. Optimal Design of Filament – Wound Anisogrid Composite Lattice Structures / Proc. of the 16-th Annual Techn. Conf. of American Society for Composites. Blacksburg, USA, 2001 (CD).
7. Totaro G., Vasiliev V.V., De Nicola F. Optimized Design of Isogrid and Anisogrid Lattice Structures / Proc. of the 55-th int. Astronautical Congr. Vancouver, Canada, 2004 (CD).
8. Totaro G., Gurdal Z. Optimal Design of Composite Lattice Structures for Aerospace Application / Proc. of European Conf. for Aerospace Sciences. Moscow, Russia, 2005 (CD).
9. Bakhvalov Yu. O., Molochev V.P., Petrokovskii S.A., Barynin V.A., Vasiliev V.V., Razin A.F. Proton-M Composite Interstage Structures: Design, Manufacturing and Performance / Proc. of European Conf. for Aerospace Sciences. Moscow, Russia, 2005 (CD).

Сведения об авторах

В.В. Васильев: д-р техн. наук, член-корр. РАН, зам. главного конструктора Центрального НИИ специального машиностроения (ЦНИИСМ); г. Хотьково Московской обл., Россия; тел.: 495-382-2040, vvvvas@dol.ru

В.А. Барынин: канд. техн. наук, генеральный директор и главный конструктор Центрального НИИ специального машиностроения (ЦНИИСМ); г. Хотьково Московской обл., Россия.

А.Ф. Разин: д-р техн. наук, зам. главного конструктора Центрального НИИ специального машиностроения (ЦНИИСМ); г. Хотьково Московской обл., Россия.

С.А. Петроковский: д-р техн. наук, зам. генерального конструктора ГКНПЦ им. М.В. Хруничева; Москва, Россия.

В.И. Халиманович: зам. генерального конструктора ОАО «Информационные спутниковые системы им. М.Ф. Решетнева»; Железногорск, Россия.