

УДК 629.12:678.5

В. И. Сливинский, М. В. Сливинский

Відкрите акціонерне товариство «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

## Эффективность применения сотовых конструкций в ракетно-космической технике

Надійшла до редакції 10.12.04

Розглянуто ефективність застосування чарункових заповнювачів та сотових конструкцій у виробках ракетно-космічної техніки. Наведено приклади створення сучасних чарункових конструкцій. Показано нові можливості зменшення маси чарункових конструкцій.

Сотовые конструкции широко применяются в ответственных агрегатах летательных аппаратов всех классов, в том числе ракетах различных типов, космических аппаратах [10].

Столь широкое применение этих конструктивно-технологических решений связано с высокой эффективностью сотовых заполнителей и конструкций [4, 6, 7, 11, 12].

Подтверждением этому служат высокие разрушающие напряжения сотовых конструкций по сравнению с другими при продольном сжатии, сдвиге, высокая усталостная прочность при изгибе, долговечность трехслойных панелей при воздействии переменных нагрузок, низкая поверхностная масса в широком диапазоне погонных сжимающих нагрузок при сжатии.

Сотовые конструкции обладают и рядом специфических свойств: акустической стойкостью, повышенной теплопроводностью, имеют низкую массу при использовании в качестве теплоизоляции гиперзвуковых летательных аппаратов, обладают повышенной звукоизолирующей способностью, длительной акустической стойкостью и многими другими уникальными свойствами.

В ракетно-космической технике можно выделить три направления использования сотовых конструкций:

- конструкционного назначения (головные обтекатели ракет, переходные отсеки, гаргроты, обтекатели антенн, элементы управления крылатых ракет);

- теплозащитного и теплоизоляционного назначения (аэродинамические экраны, лобовые щиты, спускаемые аппараты и др.);
- конструкции длительно работающие в условиях открытого космоса (антенны, панели негерметичных космических аппаратов, панели солнечных батарей, размеростабильные платформы и др.)

Одним из первых предприятий, применившим сотовые конструкции в конструкции ракет-носителей (РН) в бывшем СССР является ЦСКБ г. Самара. Это предприятие в конце 1960-х — начале 1970-х гг. освоило изготовление головных обтекателей, переходных отсеков, агрегатных отсеков с обшивками и сотовых заполнителей на основе стеклоткани. Сотовые конструкции изготавливали по интегральной технологии с соединением «мокрых» обшивок с сотовым заполнителем за счет связующего [15].

В переходных отсеках, головных обтекателях, гаргротах РН класса «Протон-М», «Рокот», «Ангара» ГКНПЦ им. М. В. Хруничева широкое применение нашли трехслойные сотовые конструкции с углепластиковыми обшивками и сотовые заполнители из алюминиевой фольги. Эти конструкции выполнили свою роль в концепции модернизации РН «Протон» применением новых конструкционных материалов с целью повышения энергомассовых характеристик РН; созданием новейших конструкций и современных технологий с целью увеличения массы выводимых полезных грузов.

За десять последних лет разработаны и освоены в производстве модификации головных обтекателей диаметром от 4100 мм до 4350 мм и длиной от 10 м до 15 м РН «Протон»; 77КЭ (масса 16 кг/м<sup>2</sup>); 14С75 (масса 13,5 кг/м<sup>2</sup>); БКБ (масса 12,5 кг/м<sup>2</sup>); БКА (масса 11 кг/м<sup>2</sup>).

В период с 1997 г. по настоящее время совершено более 40 успешных пусков РН «Протон-М» с головным обтекателем сотовой конструкции.

Начаты работы над современным головным обтекателем диаметром 5,1 м, поверхностная масса такого изделия будет около 6 кг/м<sup>2</sup> [8].

В спускаемых аппаратах РКК «Энергия» им. С. П. Королева и НПО им. С. А. Лавочкина сотовый наполнитель из стеклоткани изолирует металлический корпус от высоких тепловых нагрузок, воспринимаемых лобовым щитом.

Примером эффективного сочетания полимерных композиционных материалов и сотовых наполнителей являются панели солнечных батарей космического назначения [2, 3], которые вызвали необходимость существенного уменьшения толщин выпускаемых промышленностью препрегов путем раскатки пасмы углеродных волокон до толщины в один монослой [13].

Панели солнечных батарей и панели негерметичных КА с тепловыми трубами успешно использованы в работающем на орбите КА «Ямал-100» (РКК «Энергия»).

Современным этапом совершенствования конструктивно-технологических решений и снижения массы панелей сотовых конструкций для КА «Ямал-200» является применение облегченного сотового наполнителя марки 5056-6.0-23П и нанесение клея ВК-36 на торцы сотовых наполнителей. За счет этого масса каркаса панелей солнечных батарей снизилась на 0,5 кг/м<sup>2</sup> и составила 1,6 кг/м<sup>2</sup>.

Сотовые конструкции успешно применяются в ГКБ «Южное». Это панели солнечных батарей КА «Микроспутник», панели теплошумоизоляции для головных обтекателей РН «Днепр», «Зенит-2М».

Современные тенденции развития ракетно-космических систем и ужесточение требований к массовым характеристикам определяют более широкое применение сотовых конструкций в новых разработках ГКБ «Южное» [9]. Так, целесообразно рассмотреть возможность создания головных обтекателей для новых модификаций РН «Зенит» и «Циклон» трехслойной сотовой конструкции. Предварительный расчет показывает возможность снижения массы изделий до 40 % по сравнению с металлическим вариантом.

Одним из путей снижения массы КА «Микроспутник» является вариант изготовления силовой

конструкции платформы с использованием сотовых панелей. Новизна решения позволит снизить массу платформы на 30—40 % по сравнению с существующим аналогом.

ФГУП НПО ПМ им. академика М. Ф. Решетнева является наиболее динамичным предприятием, быстро осваивающим производство сотовых конструкций космического назначения. Оригинальная конструкция негерметичных панелей КА с жидкостными коллекторами сложной формы — это лишь одна из многих задач, которые в настоящее время успешно решает предприятие. Для этого потребовалась мобилизация не только собственных ресурсов предприятия (организация производства сотовых конструкций, приобретение нового оборудования и др.), но и ужесточение требований к качеству выпускаемых сотовых наполнителей, а также разработка новых видов сотовых наполнителей (только за последний год нами для НПО ПМ разработаны шесть новых типоразмеров сотовых наполнителей).

Среди разработок сотовых конструкций этого предприятия эллипсовидная вырезка из параболоида вращения спутника непосредственного телевизионного вещания; плита полезной нагрузки спутника обеспечения подвижной связи; астроплаты для размещения приборов системы ориентации и стабилизации; сотовая базовая плита и приборные стойки для размещения блоков ретрансляции и антенн спутника телевизионного вещания; панели негерметичного исполнения спутника фиксированной связи и др.

Для обеспечения предприятий ракетно-космического комплекса в ОАО «УкрНИИТМ» создано производство сотовых наполнителей из различных материалов: алюминиевой фольги, полимерной бумаги «Номекс», стеклоткани, крафт-бумаги, пленки ПЭТФ, углеродной ленты. Производятся более 60 типоразмеров сотовых наполнителей. Каждый из перечисленных наполнителей имеет свои специфические особенности и свою сферу применения. Так, сотовые наполнители из фольги имеют высокие показатели удельной прочности и жесткости, а также теплопроводны. Наполнитель из полимерной бумаги относится к самозатухающим материалам, влаго- и химически стоек, радиопрозрачен, кроме того, этот сотовый наполнитель обладает уникальной способностью сохранять эксплуатационные качества без необратимых повреждений при перегрузках в локальных участках. Сотовые наполнители на основе стеклоткани имеют хорошие теплозащитные и теплоизоляционные свойства, радиопрозрачны. Сотовые наполнители из крафт-бумаги являются самыми дешевыми, с помощью пропитывающих составов им можно придать свойства негорю-

чести, влаго- и грибостойкости, повысить их механические характеристики. Углетопласт обладает максимальными абсолютными и удельными механическими характеристиками, с обшивками из углепластика является химически однородной и размеростабильной конструкцией. Сотовые заполнители на основе стеклоткани с ячейкой гибкой формы позволяет изготавливать изделие сложной геометрической формы. Паяные сотовые заполнители из стали и титановых сплавов применяются в изделиях ракетно-космической техники, эксплуатируются до температур 450 °С. Для конструкций, нагреваемых до 1000 °С и выше, применяются сотовые заполнители из стали, полученные сваркой [5].

С целью дальнейшего совершенствования характеристик массы летательного аппарата разработана методика оптимизации сотовых конструкций с включением в параметры оптимизации геометрических и механических характеристик сотовых заполнителей [10].

На примере головных обтекателей показана возможность дополнительного снижения их массы (на 10—13 %) за счет использования эксклюзивного сотового заполнителя.

В последнее время возникла необходимость в разработке суперлегких (массой менее 1 кг/м<sup>2</sup>) сотовых панелей (панели солнечных батарей и панели теплоизоляции внутриобтекательного пространства).

Применение серийно выпускаемых пленочных клеев массой 280—300 г/м<sup>2</sup> в таких конструкциях неоправданно, так как относительная масса клеев в сотовых конструкциях при этом достигает 55—70 %.

Разработана и освоена технология адресного нанесения клея на торцы ячеек сотовых заполнителей, позволяющая регулировать массу клея от 20 до 120 г/м<sup>2</sup> при одностороннем его нанесении [14].

Применение всех вышеперечисленных возможностей позволяет вести дальнейшее совершенствование характеристик массы летательного аппарата. Опыт показывает, что при замене монолитных или подкрепленных конструкций на сотовые достигается снижение массы на 25—40 %, новые возможности создания рациональных сотовых конструкций позволяют повысить этот показатель до 45—55 %.

Достигнутый и перспективный уровень массовых характеристик изделий ракетно-космической техники сотовых конструкций приведен в таблице.

Рациональное применение сотовых конструкций в той или иной области должно основываться на принципе достаточности их функциональных характеристик, связанном с экономическим аспектом [1]. Это, в свою очередь, требует комплексного анализа конструктивно-технологических решений применяемых сотовых конструкций с учетом техно-

Уровень массовых характеристик изделий ракетно-космической техники сотовых конструкций

Изделие	Фирма	Погонная масса, кг/м <sup>2</sup>	
		достигнутая на 2003 г.	перспектива 2007 г.
Каркасы панелей солнечных батарей «Ямал-100», «Ямал-200», «Микроспутник»,	РКК «Энергия»	1,622	1,0
каркасы БФ головные обтекатели РН «Протон-М»	ГКБ «Южное»	1,6	1,0
Панели негерметичных корпусов КА «Ямал» с тепловыми трубами	ГКНПЦ им. М.В. Хруничева	11,0	6,0
Панели негерметичных корпусов КА связанных спутников с жидкостными коллекторами	РКК «Энергия»	6,0—8,0	4,0—7,0
	НПО ПМ	5,4—12,4	5,0—10,0

логии изготовления сотовых заполнителей на различных стадиях подготовки производства и изготовления изделий.

Таким образом, объективными предпосылками для эффективного применения сотовой конструкции в ракетно-космической технике и других областях является не только уже реализованные и показанные преимущества сотовой конструкции, но и решение ряда проблем, связанных с оптимизацией технологических допусков на параметры сотового заполнителя в зависимости от назначения сотовой конструкции, в которой он применяется, разработкой классификатора сотовых заполнителей, квалиметрии сотовых заполнителей в системе управления качеством продукции и другими, в комплексе составляющими научные основы технологической подготовки и производства сотовых заполнителей и сотовых конструкций.

1. Гайдачук А. В., Сливинский В. И. О концепции квалиметрии и управления качеством производства сотовых заполнителей и конструкций // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: НАКУ, 2000. — Вып 22(5). — С. 56—64.
2. Гайдачук В. Е., Грошевой А. И., Кириченко В. В., Сливинский В. И. Концепция теоретического обеспечения технологии изготовления суперлегких панелей солнечных батарей космического назначения // Авиационно-космическая техника и технология: Тр. Харьков. авиац. ин-та им. Н. Е. Жуковского за 1997 г. — Харьков: ХАИ, 1998. — С. 322—327.
3. Гайдачук А. В., Кириченко В. В., Сливинский В. И. и др. Методика оптимального проектирования облегченных конструкций солнечных батарей // Авиационно-космическая

- техника и технология: Сб. науч. тр. — Харьков: ХАИ, 1995.—С. 212—217.
4. Ендогур А. И., Вайнберг М. В., Иерусалимский К. Н. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. — М.: Машиностроение, 1986.—200 с.
  5. Иванов А. А., Кашин С. М., Семенов В. И. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники. — М.: Энергоатомиздат, 2000.—584 с.
  6. Кобелев В. Н., Коварский Л. М., Тимофеев С. И. Расчет трехслойных конструкций. — М.: Машиностроение, 1984.—304 с.
  7. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с заполнителями. Справочник. — М.: Машиностроение, 1991.—272 с.
  8. Петраковский С. В., Бахвалов Ю. О., Мухин Н. В., Комиссар О. Н. Возможности повышения энергомассовых характеристик ракеты-носителя «Протон-М» путем внедрения конструкций из полимерных композиционных материалов // Тез. докл. XII науч.-техн. конф. — Обнинск, 2001.—С. 107—110.
  9. Сигало В. Г., Артеменко Ю. Г., Телевной Ф. М. Перспективы применения СК в разработках КБ «Южное» // Космич. техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. — Днепропетровск: ГКБ «Южное», 2004.—Вып. 1.—335 с.
  10. Сливинский В. И. Конструктивно-технологические решения по созданию рациональных сотовых конструкций различного назначения // Машиностроение Украины: Новые технологии. — Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1999.—С. 51—88.
  11. Сливинский В. И. Научно-технические предпосылки создания в Украине наукоемкой технологии и производства сотовых заполнителей и конструкций на их основе для различных отраслей промышленности // Технологические системы.—1999.—№ 2.—С. 16—18.
  12. Сливинский В. И., Пергат В. В., Ткаченко Г. В. Сотовые заполнители. Классификация, применение, расчет физико-механических характеристик. — ЦНТИ «Поиск», 1990.—43 с.
  13. Сливинский В. И., Тамайо Х. Э. Технологические возможности формирования супертонких препрегов для несущих панелей солнечных батарей космического назначения // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: ГАКУ «ХАИ», 1999.—Вып. 17(4).—С. 68—77.
  14. Сливинский В. И., Тамайо Х. Э. Эффективность нанесения клея из расплава на торцы сотового заполнителя // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: НАКУ, 2000.—Вып. 22(5).—С. 146—150.
  15. Таран Г. Ф., Кашицян А. Н., Максимов С. В., Поспелов О. В. Применение конструкций из полимерных композиционных материалов как перспективное направление решения задач по созданию изделий типа «Союз» // Материалы двадцать второй ежегодной международной науч.-практ. конф. «Композиционные материалы в промышленности». — Ялта, 2002.—С. 117—118.

---

#### EFFICIENCY OF APPLICATION OF CELLULAR DESIGNS IN ROCKET-SPACE TECHNOLOGY

*V. I. Slyvyns'kyu, M. V. Slyvyns'kyu*

The efficiency of application of cellular fillers and cellular designs in products of rocket-space technology is considered. Some examples of creating modern cellular designs are given. New possibilities of decrease in weight of cellular designs are shown.