

## **КОМПОЗИТЫ: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ**

*Показаны преимущества применения полимерных композиционных материалов, позволяющие повысить массовую и функциональную эффективность ракетно-космической техники. Приведен обзор применения полимерных композиционных материалов в разработках ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля. Рассмотрены основные направления применения композитов*

**Ключевые слова:** ракетно-космическая техника, композиционные материалы конструкционного назначения, органоволокна, углеродные волокна, конструкторско-технологические решения, массовая эффективность, прочностные свойства.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современная ракетно-космическая техника немыслима без композиционных материалов (КМ). При разработке средств исследования космического пространства требуются новые материалы, выдерживающие нагрузки космических полетов (высокие температуры и давление, вибрационные нагрузки, глубокий вакуум, радиационное воздействие и т. д.), имея при этом низкую массу. Применение КМ позволяет снизить вес изделия на 10...50 % и сократить расход топлива, повысив при этом надежность [1].

В разработках ГП «КБ «Южное» широко используются КМ на основе угле-, органико-, базальто- и стекловолокон, что дает возможность разрабатывать изделия с минимальным весом и максимальными упруго-прочностными характеристиками постоянными в течение 25 — 30 лет, обладающие стойкостью к воздействию агрессивных сред и циклическим нагрузкам, уникальными теплофизическими свойствами, высокой терморазмерностойкостью и эрозионной стойкостью [2, 6].

Основными направлениями применения КМ являются: силовые конструкционные элементы; теплозащитные и теплоизоляционные покрытия; эрозионностойкие элементы конструкций.

**Корпуса твердотопливного ракетного двигателя и сопловые блоки.** Большой опыт отработки силовой конструкции был получен (конец 1970-х — начало 1980-х гг.) при создании корпуса крупногабаритного твердотопливного ракетного двигателя (РДТТ) (рис. 1), работающего при воздействии внутреннего давления и осевого сжатия. Конструкция двигателей на 80—90 % состояла из КМ. Для изготовления корпуса типа «кокон» использовалось более 1 т высокопрочных арамидных волокон и около 1.5 т эпоксидного связующего. При этом проблемам максимальной реализации исходных прочностных свойств арамидных волокон уделялось большое внимание [4].

Проведен ряд экспериментальных исследований по разработке способов повышения степени реализации исходных прочностных свойств органоволокон в КМ, таких как выбор связующих для «мокрой» намотки силовой оболочки и «сухой» намотки узлов стыка, оценка эффективности основных типов органоволокон (ЖСВМ,

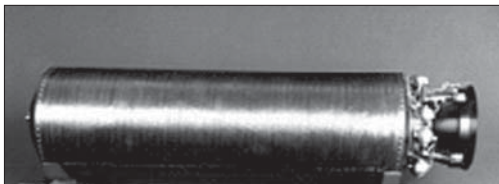


Рис. 1. Корпус РДТТ



Рис. 2. Деталь из УУКМ 3D-структуры

Амос, ЦФ ЖСВМ), исследования по оптимизации структуры армирующих наполнителей; «пневмообработка» и аппретирование волокон перед намоткой корпусов типа «кокон» с целью улучшения связи на границе «волокно — связующее», оптимизация режима отверждения силовой оболочки корпуса двигателя. Значения основного критерия эффективности разработанных корпусов двигателей достигали 32 — 35 км.

Одной из проблем при создании узлов двигателя является отсутствие в Украине полного цикла изготовления деталей из углерод-углеродного материала (УУКМ) 3D-структуры (рис. 2). Технология его изготовления, которая полностью восстановлена в настоящее время, заключается в плетении армирующего каркаса (преформы) 3D-структуры из углеволокна и уплотнении каркаса. Кроме того, с 2006 г. ведутся работы по разработке материала аналогичного класса с применением новых наполнителей и армирующих структур.

Последние достижения в сфере материаловедения и новых технологий дают возможность усовершенствовать энергомассовые характеристики жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), разрабатываемых ГП «КБ Южное» [5].

Одним из путей совершенствования ЖРД является применение сопловых насадков из УУКМ. Это позволяет увеличить степень расширения

сопла в сочетании с обеспечением приемлемого теплового режима его конструкции и повысить величину удельного пустотного импульса тяги при снижении общей массы двигателя.

Для условий ЖРД разработаны и опробованы крупногабаритные сопла из УУКМ на основе углеродных волокнистых материалов тканой структуры — «Граурис», «Розетта», CarboSEP.

В ГП «КБ Южное» разработана новая технология изготовления соплового насадка радиационного охлаждения из УУКМ на основе углеродного волокнистого материала трикотажной структуры, предназначенного для комплектации двигателя третьей ступени РН «Циклон-4» (рис. 3).

Сопловой насадок представляет собой тонкостенную профилированную оболочку переменной толщины в виде раструба с установленными на его малом диаметре металлическими сегментами, с помощью которых насадок стыкуется с камерой двигателя. Раструб выполнен из УУКМ, защищенного от окисления путем объемной пропитки силикатным составом и имеющего наружное защитное металлополимерное покрытие. Сегменты изготовлены из титанового сплава и крепятся к раструбу с помощью клея и шпилек.



Рис. 3. Жидкостный ракетный двигатель с насадком из УУКМ

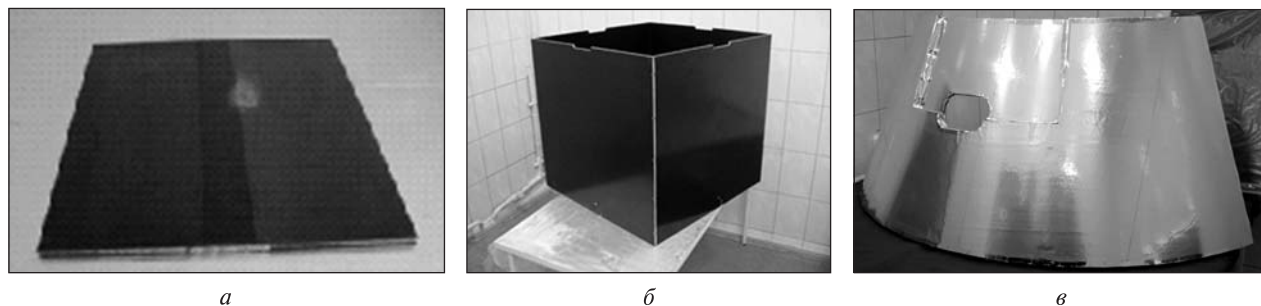


Рис. 4: а — сотовластовое основание СБ, б — тепловой экран трехслойной сотовой конструкции, в — теплоизоляция трехслойной сотовой конструкции

При создании соплового насадка решены следующие задачи: выбраны основные исходные материалы; спроектирована и изготовлена технологическая оснастка, разработана технологическая документация и отработана технология изготовления сопловых насадков, исследовано влияние высокотемпературного воздействия на окислительную стойкость УУКМ и разработан способ его защиты от окисления, разработана методика и выполнен неразрушающий контроль качества материала насадков.

Разработанная технология обеспечила изготовление сопловых насадков из УУКМ с заданными массовыми и прочностными характеристиками, эрозионной и окислительной стойкостью. Это подтверждено огневыми испытаниями экспериментальных насадков и статическими испытаниями камеры двигателя со штатным сопловым насадком [3].

**Каркасы солнечных батарей.** Основным узлом энергообеспечения космических аппаратов (КА) являются солнечные батареи (СБ). Важный элемент СБ — основание (каркас), на котором устанавливаются фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии. От весового совершенства каркаса, его прочностных и жесткостных характеристик, размерностабильности и стойкости к факторам космического пространства (ФКП) во многом зависит качество, надежность и длительная работоспособность СБ в целом. Поэтому внедрение сотовых конструкций (СК) как наиболее эффективного пути снижения веса приобрело весьма актуальное значение.

Для создания более совершенных по массе оснований СБ был разработан ряд конструктив-

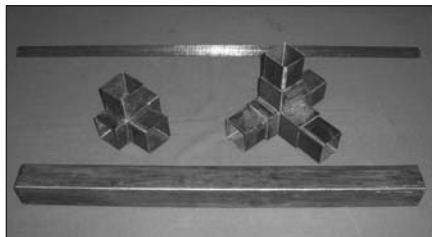
но-технологических решений (КТР), предусматривающих использование тонких (толщиной порядка 0,2 мм) обшивок из углепластика; применение сотового заполнителя (СЗ) из тонкой (23 мкм) алюминиевой фольги, адресное нанесение клея на торцы сот для их приклеивания к обшивкам, использование облегченных металлических вставок.

В результате обработки и комплексных исследований сотовластовых оснований СБ (рис. 4, а) разработан комплекс КТР, обеспечивший изготовление сотовластовых оснований с удельной массой 1 кг/м<sup>2</sup>; внедрение в производство технологии изготовления и контроль трехслойных СК с улучшенными характеристиками; работоспособность сотовластовых оснований в условиях как наземной, так и орбитальной эксплуатации.

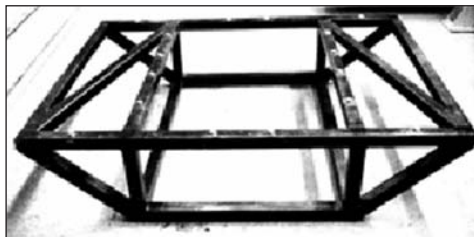
**Тепловые экраны.** Для поддержания заданной температуры внутри КА в ГП «КБ «Южное» была разработана система терморегулирования, основной частью которой являются трехслойные тепловые экраны (рис. 4, б), которые крепятся к силовой раме КА и обеспечивают поддержание внутри аппарата необходимых тепловых режимов, а также требуемую степень чистоты внутри аппарата. Тепловые экраны были установлены на КА «Egyptsat» и МС-2...МС-8.

**Теплоизоляция трехслойной конструкции для головного обтекателя.** При запуске современных КА предъявляются высокие требования по обеспечению заданных температурно-влажностного режима и уровня чистоты воздуха во внутренней полости головного обтекателя (ГО) на всех этапах эксплуатации РН совместно с КА. Эти па-

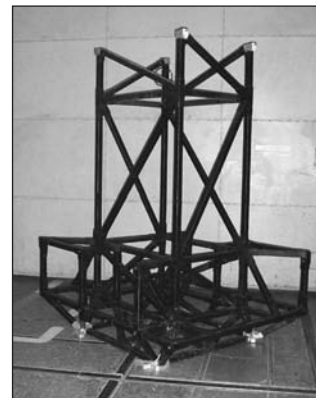
Рис. 5: а — элементы фермы из углепластика, б — бесфитинговая ферма из углепластика, в — углепластиковая ферменная конструкция



а



б



в

раметры в значительной мере обеспечиваются за счет внутренней теплоизоляции (ТИ) ГО.

Ранее в конструкции ГО применялась «мягкая» теплоизоляция на базе матов МБП-С (маты базальтовые прошивные). Однако такая ТИ не обеспечивает заданный уровень чистоты воздуха в полости ГО и уменьшает размер зоны полезного груза (до 40 мм).

В ГП «КБ «Южное» разработана новая внутренняя теплоизоляция «твердого» типа на основе трехслойной СК (рис. 4, в), состоящая из двух стеклопластиковых обшивок с односторонним фольгированием и СЗ высотой 10–30 мм. В качестве обшивки выбрана алюминиевая фольга, обеспечивающая коэффициент черноты поверхности не более 0.1. Для соединения обшивок с СЗ использован клей эпоксидного типа, обеспечивающий высокую прочность склейки при его минимальном нанесе (0.14–0.15 кг/м<sup>2</sup>).

Выбранный клей и разработанная технология склейки позволили получить высокую прочность соединения обшивок с СЗ. Так, разрушающее напряжение конструкции при равномерном отрыве составляет 1.5–1.9 МПа.

В результате применения разработанной трехслойной ТИ, допускающей операции очистки, количество остаточных молекулярных загрязнений на поверхности ТИ не превышает 10 мг/м<sup>2</sup>, а наличие поверхностных механических загрязнений соответствует уровню 500 по стандарту MIL-STD-1246С.

Таким образом, в ГП «КБ «Южное» разработана принципиально новая высокоэффективная

теплоизоляция для ГО РН, которая имеет минимальную удельную массу (не более 1 кг/м<sup>2</sup>), коэффициент эффективной теплопроводности в интервале температур 20–150 °С составляет 0.07–0.11 Вт/(м·К); обеспечивает выполнение всех требований по чистоте подобтекательного пространства и уровню газовыделений материалов, а также максимально возможный диаметр зоны для размещения полезного груза.

В настоящее время разработанная теплоизоляция используется в качестве внутренней теплоизоляции ГО для РН «Зенит-2SLБ» и «Циклон-4».

**Углепластиковые фермы для космических аппаратов.** Одними из основных направлений развития КА «службы» Земли являются: повышение точности ориентации КА на наземные ориентиры; повышение разрешающей способности целевой аппаратуры.

Указанные тенденции накладывают требования и на конструкцию КА, требующие более точной и стабильной «привязки» целевой аппаратуры к датчикам ориентации КА.

Основным дестабилизирующим фактором в процессе эксплуатации КА на орбите являются температурные деформации конструкции, требующие поиска новых материалов. Высокие упруго-прочностные свойства и удельный вес углепластика ( $\approx 1.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) позволяют использовать его в размерностабильных ферменных конструкциях КА.

На настоящий момент выполнены следующие основные работы:

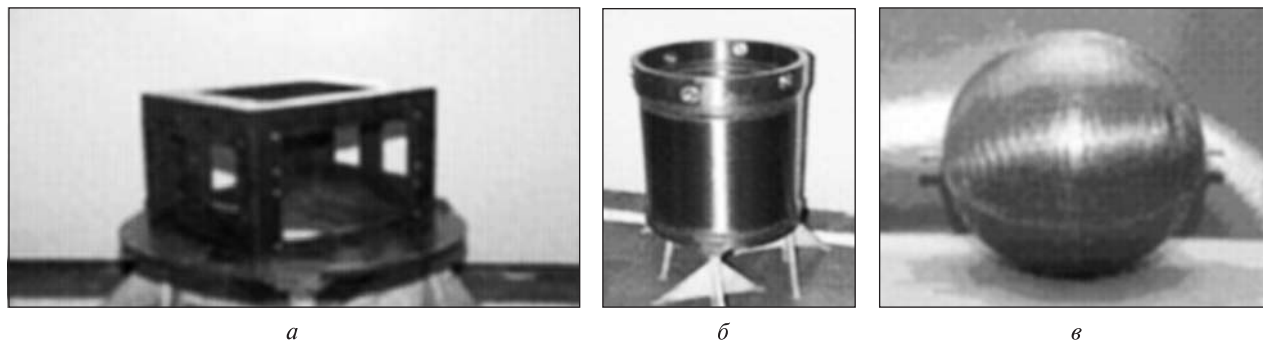


Рис. 6: а — корпус объектива, б — тубус, в — металлопластиковый шаробаллон

- освоена намотка углеволокна на оправку при изготовлении элементов фермы (рис. 5, а): труб круглого и прямоугольного сечений, многолучевых фитингов (с ортогональными лучами);

- отработана схема армирования элементов, позволяющая получать минимальный коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) до  $0.2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  на углепластиковых стержнях;

- освоен высокоточный метод определения КЛТР на основе голографической интерферометрии;

- разработана и изготовлена углепластиковая бесфитинговая ферма (рис. 5, б);

- разработана и изготовлена крупногабаритная углепластиковая ферма (рис. 5, в).

В настоящее время разрабатываются КТР по созданию фитинга с неортогональными лучами, в котором волокна в противоположных лучах, лежащих на одной прямой, не изгибаются. Проводятся исследования по оценке влияния временных факторов и температурных циклов на размерностабильность ферменных конструкций.

**Корпус телескопа.** В настоящее время ГП «КБ «Южное» набирает опыт разработки и изготовления несущих конструкций оптических приборов космического назначения (сканеров, телескопов, объективов). Их отличительной особенностью являются высокие требования по терморазмерностабильности на уровне менее 0.1 мм/м в условиях циклического изменения температуры от  $-150$  до  $+150$  °С. Для достижения этих требований рационально применение конструкций из

КМ, которые обладают низким коэффициентом теплового расширения, малой массой, высокой прочностью и жесткостью.

Так, спроектирован, изготовлен и проходит испытания объектив высокого разрешения для КА дистанционного зондирования Земли, основные несущие элементы которого — корпус (рис. 6, а) и тубус (рис. 6, б) выполнены из углепластика.

**Шаробаллоны высокого давления.** На ракетоносителях разработки ГП «КБ «Южное» в качестве аккумуляторов давления широко используются емкости, наполненные газом под давлением 300 — 400 атм взамен достаточно больших по весу баллонов из высокопрочной стали или титановых сплавов. Для уменьшения веса разработана технология упрочнения тонкостенных оболочек, имеющих форму шара, высокопрочным органоматериалом типа «Русар». Такие шаробаллоны состоят из внутреннего стального корпуса (сталь 12Х18Н10Т) толщиной 1 мм, обеспечивающего герметичность, и наружной упрочняющей органоматериаловой оболочки, обеспечивающей работоспособность конструкции (рис. 6, в).

В ходе проведенных работ решены следующие задачи: спроектирована и изготовлена технологическая оснастка; разработана технологическая документация на изготовление упрочняющей оболочки (УО) баллона, разработаны и отработаны программы управления намоточным станком при зональной намотке упрочняющих оболочек, отработаны технологические параметры изготовления шаробаллонов, разработаны три типа шаробаллонов объемом 11, 33 и 42 литра.

Разработанная технология упрочнения шаро-баллона обеспечивает снижение веса конструкции на 20—25 % по сравнению с титановым баллоном и 40—42 % по сравнению с баллоном из стали СП-28.

Для дальнейшего совершенствования шаро-баллонов проводятся работы по замене стального лайнера на пластиковый, а также замене армирующего органоволокна на высокопрочное углеволокно (типа Т-800). Целью указанных работ является дальнейшее снижение веса конструкции (на 20—30 %) и увеличение количества возможных заправок от 50—60 до 1000.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, применение композиционных материалов конструкционного назначения, разработка и отработка новых технологий, а также высокоэффективные конструкторско-технологические решения позволили ГП «КБ Южное» создавать конкурентоспособные, эффективные по массе и прочностным свойствам изделия, такие как: размеростабильные конструкции космического назначения с длительным сроком эксплуатации, каркасы солнечных батарей облегченной массы до 1 кг/м<sup>2</sup>, тепловые экраны КА, комплект конструктивных элементов корпуса объектива, ферменные конструкции для КА, бесфитинговые фермы и другие изделия.

1. *Композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов* / Под ред. А. Л. Абибова. — М.: Машиностроение, 1975. — 272 с.
2. *Потанов Б.* Композиционные материалы: В 8 т. — М.: Мир, 1988. — Т. 3: Применение композиционных материалов в технике / Пер. с англ.; Под ред. Э. Фитцера. — 336 с.
3. *Потанов А. М., Артеменко Ю. Г., Тихий В. Г. и др.* Композиционные материалы в разработках ГП «КБ «Южное» // Композиционные материалы в промышленности: Сб. матер. XX Междунар. конф., 7—11 июня 2010 г., Ялта. — К.: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2010. — С. 111—119.
4. *Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное»* / Под ред. С. Н. Конюхова. — Днепропетровск: ООО «Колор-Граф», ООО РА «Тандем-У», 2001. — 240 с.
5. *Санін А. Ф., Джур Є. О., Кучма Л. Д. та ін.* Розвиток ракетно-космічної техніки в Україні. — Дніпропетровськ: АРТ-ПРЕС, 2002. — 402 с.
6. *Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн.* — М. Машиностроение, 1988. — Кн. 2. / Пер. с англ.; Под ред. Дж. Любина. — 580 с.

Стаття надійшла до редакції 21.07.15

О. М. Потанов

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

## КОМПОЗИТИ: ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ В РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ТЕХНІЦІ

Показано переваги застосування полімерних композиційних матеріалів, що дозволяють підвищити масову і функціональну ефективність ракетно-космічної техніки. Наведено огляд застосування полімерних композиційних матеріалів в розробках ДП «КБ Південне» ім. М. К. Янгеля. Розглянуто основні напрямки застосування композитів

**Ключові слова:** ракетно-космічна техніка, композиційні матеріали конструкційного призначення, органоволокна, вуглецеві волокна, конструкторсько-технологічні рішення, масова ефективність, міцнісні властивості.

О. М. Potapov

Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

## COMPOSITES: PROSPECTS FOR THE USE IN THE SPACE AND ROCKET EQUIPMENT

The advantages of the polymer composite materials, which application allows mass and functional efficiency of the space and rocket equipment to be increased, are shown. Their engineering elaborated at the SDO "Yuzhnoye" and the main areas of polymer composite applications are considered.

**Key words:** space-rocket technics, composite materials for structural application, aramid fibers, carbon fibers, design and engineering solutions, mass effectiveness, strength properties.