

УДК 620.22

*Потапов А. М., Коваленко В. А.*

Государственное предприятие «Конструкторское бюро „Южное“». Украина, г. Киев

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ НА ИХ ОСНОВЕ – ГЛАВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

### *Анотація*

*Використання композиційних матеріалів і технологій на їх основі сприяє прогресу в ракетно-космічній галузі.*

### *Abstract*

*The use of composite materials and technologies on their basis assists progress in space-rocket industry.*

Перспективы развития ракетно-космической отрасли в значительной степени связаны с использованием новых материалов и применением передовых технологий. С конца 20-го века в технике наметилось широкое применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) и, как следствие, появление новых технологий создания высокоэффективных конструкций на их основе. К этому времени были разработаны и созданы крупномасштабные производства уникальных волокон различного типа, которые не только превосходили по своим физико-механическим показателям самые высокопрочные стали, но и обладали более низкой плотностью, высокой химической стойкостью к агрессивным средам, уникальными теплофизическими свойствами. На их основе стал развиваться новый класс материалов — полимер-

ные композиты. Появились новые технологии создания изделий из полимерных композиционных материалов, использование которых открыло уникальные возможности для реализации принципиально новых конструкторских решений и технологических процессов.

Современный разработчик изделий имеет широкий выбор высокоэффективных композиционных материалов (из целого ряда армирующих наполнителей и связующих), структурных схем укладки в конструкции, технологических способов формообразования и выбора рациональной геометрии конструкции. Основной принцип создания изделий из композиционных материалов состоит в том, что задачи материалов, проектирования конструкций и разработки технологического процесса следует рассматривать как три стороны единой проблемы и решать их совместно. Такой подход требует на всех этапах создания изделия хорошего взаимодействия проектантов, специалистов по прочности, конструкторов, материаловедов и технологов.

При создании конструкции из ПКМ необходимо правильно применить материал с учетом особенностей его переработки и работоспособности в эксплуатационных условиях. Выбор материала в значительной мере определяет технологию изготовления изделия. Отличительной особенностью изготовления конструкций из ПКМ является то, что материал



и изделие в большинстве случаев создаются одновременно. При этом изделие в большинстве случаев сразу получают заданные геометрические размеры и форму, что позволяет существенно снизить его стоимость по сравнению с изделиями из традиционных материалов, несмотря на то, что исходные материалы для ПКМ имеют стоимость выше, чем стали и сплавы.

В отличие от металлообрабатывающих технологий процессы производства изделий из ПКМ позволяют существенно повысить коэффициент использования материала и довести его до значений 0,8–0,95. Кроме того, по сравнению с металлическими конструкциями, удается сократить количество сборочных единиц, устранить целый ряд сборочных операций, заменив их клеевыми соединениями, либо сразу получить готовые изделия непосредственно при формовании. В итоге это снижает трудоемкость изготовления изделий из ПКМ в 1,5–2,5 раза по сравнению с традиционными металлическими аналогами.

В настоящее время существует много технологических процессов переработки ПКМ в изделия различных габаритов, конфигураций и целевого назначения. И целесообразнее всего рассмотреть вопросы применения новых технологий на имеющемся опыте ГП «КБ «Южное» по созданию изделий из полимерных композиционных материалов для изделий ракетно-космической техники и народного хозяйства, а также современного спортивного инвентаря.

Длительное время в ГП «КБ „Южное“» велась разработка крупногабаритных твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ). Их конструкция состояла на 80–90% из полимерных композиционных материалов (рис. 1).

В процессе создания таких конструкций большое внимание уделялось технологическим вопросам: бы-

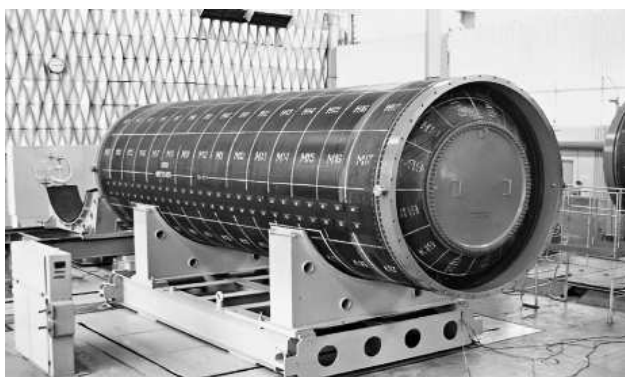


Рис. 1. Корпус РДТТ из полимерных композиционных материалов

ло спроектировано и изготовлено уникальное технологическое оборудование. Корпуса РДТТ изготавливались методом «мокрой» намотки на крупногабаритных намоточных станках с программным управлением. При этом обеспечивалась высокоточная ук-

ладка армирующего наполнителя на оправку и выдерживались все необходимые параметры намотки. В результате разработанные в ГП «КБ „Южное“» корпуса двигателей по основному критерию эффективности превосходили лучшие зарубежные аналоги.

Одной из самых актуальных проблем при создании РДТТ является изготовление из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) самых высоко нагруженных деталей, работающих при температурах более 2500 градусов Цельсия и давлениях до 300 атмосфер (рис. 2).



Рис. 2. Детали из УУКМ

Технология изготовления УУКМ создана содержит два основных этапа:

- плетение армирующего каркаса (преформы) 3D-структуры из углеродного волокна;
- уплотнение каркаса.

Сегодня в ГП «КБ „Южное“» совместно со смежными организациями разрабатывается украинский материал аналогичного класса с применением новых компонентов и технологий.

Последние достижения в сфере материаловедения и новых технологий дают возможность усовершенствовать характеристики жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), разрабатываемых предприятием. Один из путей совершенствования – применение неохлаждаемых сопловых насадок из УУКМ (рис. 3). 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.

В ГП «КБ „Южное“» разработана технология изготовления соплового насадка из УУКМ на основе углеродного волокнистого материала трикотажной структуры, предназначенного для комплектации двигателя третьей ступени РН «Циклон-4». Такой сопловой насадок обеспечивает заданные массовые и прочностные характеристики, обладает высокой эрозийной и окислительной стойкостью. Это подтверждено огневыми испытаниями экспериментальных насадок и статическими испытаниями камеры двигателя со штатным сопловым насадком.

В настоящее время в мировой ракетно-космической отрасли возникла большая потребность по

изготовлению размеростабильных прецизионных конструкций применяемых в КА и платформах. Значительные стоимость и востребованность таких конструкций обуславливают высокую рентабельность создания специальных производств для их изготовления.

Создание космических аппаратов нового поколения с повышенными требованиями к их качеству и надежности должно проводиться с учетом обеспечения более высоких исходных технических требований, а именно:

- увеличения срока активного существования до 15–20 лет, вместо 5, имеющих место в настоящее время;
- повышения разрешающей способности целевой аппаратуры;
- обеспечения минимальных изменений размеров конструкций под влиянием циклического изменения температур;
- возможности более жестких условий эксплуатации изделий с выходом на геостационарные орбиты по сравнению с низкими орбитами;
- повышения прочностных и жесткостных характеристик конструкций;
- снижения веса конструкций.

Основным дестабилизирующим фактором в процессе эксплуатации КА на орбите являются темпе-

ратурные деформации элементов конструкции. По этой причине и возник закономерный интерес к конструкционным материалам, обладающим низкой температурной деформативностью. Такими материалами являются инварные сплавы и углепластик. По сравнению с инварными сплавами, имеющими удельный вес  $8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, углепластик имеет удельный вес  $1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Кроме того, углепластик обладает достаточно высокими упруго-прочностными характеристиками. Сочетание таких свойств позволяет использовать его в размеростабильных конструкциях.

С целью выбора наиболее подходящего армирующего наполнителя для решения поставленных задач, нами проведен анализ мирового рынка углеродных волокон. В условиях опытного производства ИП «КБ „Южное“» были изготовлены и испытаны опытные конструкции на основе российских углеродных волокон УКН-5000, ЛУ-П, Элур, японских Т-300, Т-700, Т-800, английского TAIRYFIL и немецкого TOHO TENAX. На основании упруго-прочностных свойств полученных углепластиков, технологичности переработки углеродных волокон, а также экономических показателей в качестве базового наполнителя для углепластика нами выбрано высокопрочное углеродное волокно марки ТС 36S-12K компании TAIRYFIL (Великобритания), характеристики которого соответствуют углеродному Т-700.

В настоящей статье рассмотрены материаловедческие, технологические и производственные аспекты создания прецизионных конструкций космического назначения.

#### Каркас солнечной батареи (рис. 4)

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, размеростабильности и стойкости к факторам космического пространства (ФКП) во многом зависит качество, надежность и длительная работоспособность СБ в целом.

ИП «КБ „Южное“» имеет большой опыт создания таких конструкций. Так, солнечные батареи, разработанные и изготовленные на нашем предприятии успешно эксплуатируются на космическом аппарате «Egypstsat» и установлены на аппарат МС-2-8. При этом удельная масса каркасов составляет 1 кг/м<sup>2</sup>.

Для создания более совершенных по массе каркасов СБ разработан ряд конструктивно-технологических решений (КТР), предусматривающих:

- создание тонких многослойных (толщиной ~ 0,1 мм) обшивок из углепластика за счет «раскатки» углеродного волокна;



Рис. 3. ЖРД с насадком из УУКМ



Рис. 4. Сотопластовое основание СБ



Рис. 5. Тепловой экран трехслойной сотовой



Рис. 6. Корпус объектива



Рис. 7. Тубус объектива

- применение сотового заполнителя из тонкой (20 мкм) алюминиевой фольги;
- адресное нанесение клея на торцы сот для их приклеивания к обшивкам;

Реализация вышеуказанных мероприятий позволит получать каркасы с удельной массой не более 0,8 кг/м<sup>2</sup>.

#### Тепловые экраны (рис. 5)

Для поддержания заданной температуры внутри космических аппаратов (КА) в ГП «КБ „Южное“»

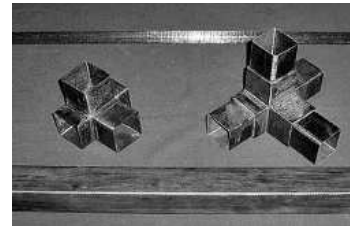


Рис. 8. Элементы фермы из углепластика

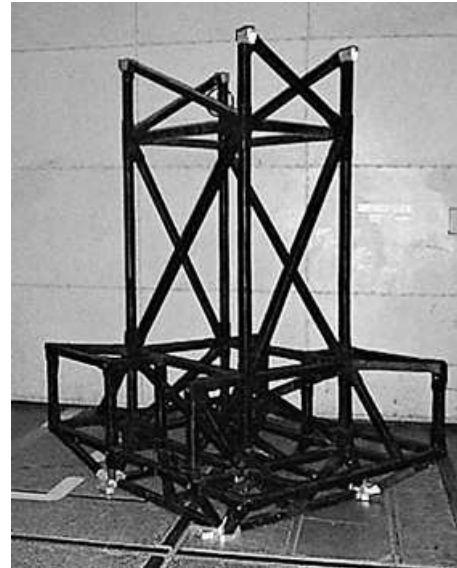


Рис. 9. Углепластиковая ферменная конструкция

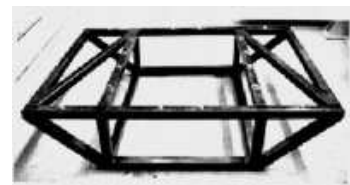


Рис. 10. Бесфитинговая ферма из углепластика

была разработана оригинальная система терморегулирования. Основной частью этой системы являются трехслойные тепловые экраны. Они крепятся к силовой раме КА и обеспечивают поддержание внутри аппарата необходимых тепловых режимов.

Тепловой экран представляет собой трехслойную конструкцию, состоящую из двух углепластиковых обшивок на основе углеродной волокна и эпоксидного связующего, а также алюминиевого сотового заполнителя. Склеивка обшивок с сотовым заполнителем производится при помощи эпоксидного клея. Наряду

с тепловыми функциями экраны обеспечивают необходимую степень чистоты внутри аппарата. Тепловые экраны были установлены на космических аппаратах «Egypstsat» и МС-2-8.

#### Комплект конструктивных элементов корпуса объектива (рис. 6, 7)

В настоящее время ГП «КБ „Южное“» набирает опыт разработки и изготовления несущих конструкций оптических приборов космического назначения (сканеров, телескопов, объективов). Отличительной особенностью таких конструкций являются высокие требования по терморазмеростабильности (на уровне более 0,1 мм/м) в условиях циклического изменения температуры от минус 150 °С до плюс 150 °С. Для достижения этих требований рационально применение конструкций из композиционных материалов, которые обладают преимуществами по сравнению с конструкциями из традиционных материалов — низким коэффициентом теплового расширения, малой массой, высокой прочностью и жесткостью.

Так, спроектирован, изготовлен и в настоящее время проходит испытания объектив высокого разрешения для космического аппарата дистанционного зондирования Земли, основные несущие элементы которого — корпус (рис. 6) и тубус (рис. 7), выполненные из углепластика.

Тубус представляет собой цилиндрическую обечайку диаметром ~0,9 м длиной ~1 м со шпангоутами в виде утолщений на торцах обечайки. По внутренней поверхности тубуса вклеены кольцевые диафрагмы. Корпус выполнен в виде прямоугольного толстостенного (~20 мм) параллелепипеда (с размерами ~0,5×0,5×0,6 м) с цилиндрической пластиной (диаметром ~0,9 м) на одной из его граней. Заготовка тубуса изготовлена методом выкладки и автоматизированной намотки, заготовка корпуса изготовлена методом выкладки на оснастке с обеспечением заданной схемы армирования. После механической обработки углепластиковых заготовок в корпус и тубус с помощью высокоточных выполненных кондукторов вклеены титановые втулки, образующие посадочные поверхности оптических элементов. Применение высокоточных кондукторов, обеспечивающих требуемый допуск плоскостности, взаимной параллельности и перпендикулярности посадочных поверхностей оптических элементов, позволило избежать механической обработки, нежелательной для конструкции с клеевыми соединениями.

Как показал расчет, точность взаимного положения посадочных мест оптических элементов объектива, в котором используются изготовленные тубус и корпус, при условиях эксплуатации составляет по-

рядка 0,01 мм. В настоящее время проводятся оптические испытания объектива, которые покажут реально достигнутые результаты.

#### Ферменные конструкции (рис. 8)

Одними из основных направлений развития космических аппаратов являются:

- повышение точности ориентации КА на наземные ориентиры;
- повышение разрешающей способности целевой аппаратуры.

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

На примере развития космических аппаратов разработки ГП «КБ „Южное“» можно оценить эволюцию требований, предъявляемых к взаимной привязке целевой аппаратуры и датчиков ориентации для КА разработки 60-х гг. составляла 30 угл. мин. (КА «Целина-Д»), на КА разработки 80-х гг. — 15 угл. мин. (КА «Целина-О»), на КА разработки 90-х гг. — 2 угл. мин. (КА «Лыбидь»), на КА разработки 2000 года — 4 угл. сек. (телескоп КА «Сич-2»).

В течение ряда лет проведения исследований в данном направлении (совместно с Восточно-Украинским Государственным Университетом и Днепропетровским Национальным Университетом) выполнены следующие работы:

- освоена технология изготовления размеростабильных трубчатых элементов круглого и прямоугольного сечений, при этом за счет отработки схемы армирования и применения специальной технологической оснастки получен минимальный КЛТР труб (до  $0,2 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ );
- разработана технология изготовления многолучевых фитингов из углепластика (пока только с ортогональными лучами) методом «мокрой намотки»;
- разработана и изготовлена крупногабаритная углепластиковая ферма (рис. 9);
- разработана и изготовлена углепластиковая бесфитинговая ферма (рис. 10);
- освоен высокоточный метод определения КЛТР на основе голографической интерферометрии.

В данный момент проводятся исследования по оценке влияния временных факторов и температурных циклов на размеростабильность ферменных конструкций.

Таким образом, на представленных в настоящей статье примерах создания новых конструкций показано, что именно применение композиционных материалов и технологий на их основе способствует в настоящее время прогрессу ракетно-космической техники.