

УДК 629.783.02

М.Г. Добрушина, В.В. Кавун, С.И. Москалев, А.П. Щудро

ОБЗОР ТЕРМОРАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Описывается опыт ГП "КБ "Южное" в разработке терморазмеростабильных конструкций космических аппаратов на основе композиционных материалов.

Описано досвід ДП "КБ "Південне" в розробленні терморозміростабільних конструкцій космічних апаратів на основі композиційних матеріалів.

Description of Yuzhnoye SDO experience in development of thermally and dimensionally stable structures of the spacecraft made of composite materials.

Размеростабильные конструкции применяются в космических аппаратах, к которым предъявляются высокие требования к сохранности взаимного положения приборов полезной нагрузки и системы ориентации. Особенно это характерно для КА дистанционного зондирования Земли высокого разрешения. Размеростабильные конструкции должны сохранять свои размеры под воздействием различных внешних условий, т.е. механических нагрузок, температуры, влажности, факторов космического пространства, при этом изменения размеров не должны превышать единиц или десятков микрон, повороты посадочных мест под приборы не должны превышать единиц угловых минут или даже секунд. Большую долю в изменении размеров конструкции вносят деформации под воздействием перепадов температур. Изготовление конструкций из композиционных материалов на основе углеродных волокон, имеющих низкие значения коэффициента температурного расширения (КТР) на уровне от $\pm 1 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, позволяют свести к минимуму температурные деформации. Разработку и изготовление таких терморазмеростабильных конструкций космических аппаратов из углепластика ГП "КБ "Южное" проводит начиная с 1988 г.

Нашим предприятием изготовлен ряд экспериментальных терморазмеростабильных ферменных конструкций космических аппаратов.

Одной из первых разработана, изготовлена и прошла испытания наружная ферма КА АУОС-СМ-КФ, предназначенная для практической отработки конструктивных и технологических проблем создания фер-

менных углепластиковых конструкций. В качестве аналога была принята конструкция наружной фермы АУОС-СМ-КФ-КФ, изготовленная из алюминиевого сплава АМг6. Общий вид углепластиковой фермы КА АУОС-СМ-КФ приведен на рис. 1.



Рис. 1. Наружная ферма КА АУОС-СМ-КФ

Вертикальные стойки и горизонтальные балки экспериментальной фермы выполнены из углепластиковых труб с прямоугольным сечением $50 \times 50 \times 1,5$ мм и $50 \times 70 \times 1,9$ мм с КТР $(0,8 \dots 1,0) \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ и соединены углепластиковыми фитингами, изготовленными методом выкладки, накладками и уголками из углепластика и стеклопластика. Все соединения элементов конструкции выполнены на клее холодного отверждения ВК-9. Для повышения надежности узловых соединений накладки и уголки дополнительно примотаны к трубам стеклолентой, пропитанной клеем холодного отверждения.

Для крепления приборов на трубы приклеены углепластиковые бобышки с металлическими втулками. Вертикальные уг-

лепластиковые трубы присоединены к фитингам алюминиевой крышки на клее ВК-9.

Габаритные размеры фермы 1800×1800×1100 мм.

Масса фермы 40 кг.

Масса аппаратуры, устанавливаемой на ферме, 400 кг.

В результате замены алюминиевого сплава на углепластик масса фермы КА АУОС-СМ-КФ была снижена на 71 кг по сравнению с алюминиевым аналогом, что составило 64%.

Из углепластика также была разработана и изготовлена экспериментальная наружная ферма КА "Океан-О", общий вид которой приведен на рис. 2.

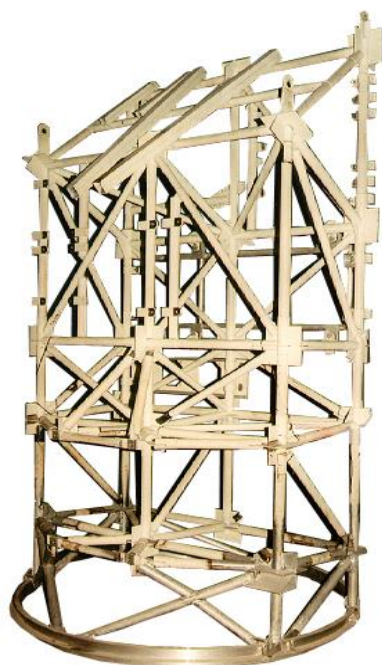


Рис. 2. Ферма КА «Океан-О»

Стойки, поперечные балки и подкосы фермы выполнены из труб круглого сечения диаметром 50 мм. Фитинги крестообразной конструкции сформированы из углепластиковых пластин толщиной 5 мм. Соединение труб с фитингами выполнено с помощью накладок в виде сектора (четвертая или вторая часть трубы).

Габаритные размеры фермы 3500×1900×1900 мм.

Масса фермы 90 кг.

Масса аппаратуры, устанавливаемой на ферме, 680 кг.

В 1998 г. разработана и изготовлена из углепластика экспериментальная ферменная конструкция для спутника связи

"Либидь", состоящая из двух частей – фермы двигательной установки (ДУ) и фермы базисного блока.

Ферма ДУ выполнена по обычной технологии: сборка фермы производится из простых углепластиковых элементов – стержней (труб), фитингов, накладок. В узлах соединения используется стеклолента для примотки накладок к трубам. Доля углепластика в такой ферме составляет 48%.

Габаритные размеры фермы 2700×1900×1900 мм.

Масса фермы 74 кг.

Ферма двигательной установки спутника связи "Либидь" изображена на рис. 3.



Рис. 3. Ферма ДУ спутника связи

Конструкция фермы имеет более 40 мест (узлов) соединения труб. Узлы отличаются друг от друга количеством труб, сходящихся в них, и углами, под которыми соединяются подкосы (диагональные трубы) в узел. Подкосы установлены на всех гранях фермы для обеспечения ее прочности и жесткости.

Трубы фермы, сходящиеся в узел под прямыми углами, соединяются с помощью углепластиковых фитингов с ортогональными лучами. Трубы, которые сходятся в узел под углом, отличным от 90°, приклеиваются и приматываются стеклолентой к фитингу с помощью накладок и угольников по месту в процессе сборки фермы.

Для стыковки фермы с ракетой-носителем и соединения с фермой базисного блока используются металлические фи-

тинги. Для обеспечения крепления панелей корпуса к ферме предусмотрены крепежные бобышки. Материал бобышек – алюминиевый сплав АМгб.

В рамках изготовления фермы ДУ разработана технология автоматизированной намотки трубчатых стержней и многолучевых фитингов из углепластика, обеспечивающая снижение КТР трубчатых элементов до значения $(0,2...0,3) \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Все трубчатые стержни фермы имеют одно и то же квадратное сечение $50 \times 50 \times 1,5$ мм и схему армирования – два кольцевых слоя (внутренний и наружный), остальные слои – продольного направления. Для исключения смещения продольных слоев при намотке в схеме предусмотрены две спиральные подмотки $+45^\circ$ одной органонитью. Длина стержней различная – от 260 до 1680 мм. Все трубчатые стержни и фитинги изготавливаются методом "мокрой" автоматизированной намотки на станке с ЧПУ. Для фитингов используется типовая пресс-форма. В качестве армирующего элемента заложена углеродная комплексная нить УКН-5000, пропитанная связующим ЭДТ-10. Крепление труб, накладок и угольников при сборке фермы выполняется на клею холодного отверждения К-300-61 в стапеле. Общий вид углепластиковых стержней и фитингов фермы ДУ приведен на рис. 4.

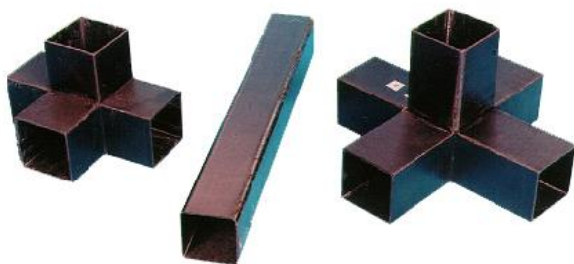


Рис. 4. Углепластиковые стержни и фитинги фермы ДУ, изготовленные методом автоматизированной намотки

Количество лучей в фитинге – до 6.

Углы между лучами фитинга – 90° или близкие к ортогональным.

Форма сечения луча фитинга – прямоугольная.

Механические характеристики фитингов, изготовленных из углепластика на ос-

нове углеродной нити УКН-5000 и связующего ЭДТ-10:

- коэффициент температурного расширения вдоль стержней – $(0,2...0,3) \times 10^{-6} \text{град}^{-1}$;
- предел прочности на сжатие – 65 кгс/мм^2 ;
- модуль упругости при растяжении – 14000 кгс/мм^2 .

Для повышения термостабильности фермы перед сборкой была проведена селекция труб по КТР с помощью голографического метода. Этот принципиально новый метод был разработан в связи с тем, что традиционные dilatометрические методы используют малую базу измерения (до 100 мм), не позволяющую проводить измерения на реальных длинномерных трубах. Принцип голографического метода состоит в том, что углепластиковая труба жестко закрепляется одним концом, перемещение другого конца трубы при изменении температуры регистрируется с помощью голографического интерферометра.

Для реализации метода по заказу ГП "КБ "Южное" в лаборатории голографии ДНУ была разработана, изготовлена и протестирована экспериментальная установка ЭГУ-1, общий вид которой приведен на рис. 5.



Рис. 5. Экспериментальная установка ЭГУ-1

Возможности голографического метода:

- точность измерения удлинения образца – $0,25 \text{ мкм}$;
- принцип замера перемещений – бесконтактный;
- высокая мобильность оптической схемы;
- диапазон измерения удлинения образца – до 25 мкм ;
- размеры контролируемых образцов: – минимальные – $50 \times 30 \times 30 \text{ мм}$;

- максимальные – $800 \times 100 \times 100$ мм;
- максимальная погрешность измерения – 4%;
- диапазон измерения температуры образца – $20 \dots 80^\circ\text{C}$;
- погрешность измерения температуры образца – $0,1^\circ\text{C}$;
- максимальная погрешность определения КТР – 10%.

Ферма базисного блока спутника связи "Либидь" выполнена из углепластика методом интегральной намотки (по принципу поэтапного формирования окончательной структуры стенок силовых элементов). Основная ее отличительная особенность – отсутствие фитингов. Для крепления приборов и соединения с фермой ДУ в трубы фермы базисного блока клеиваются закладные элементы из алюминиевого сплава. Общий вид фермы базисного блока приведен на рис. 6.

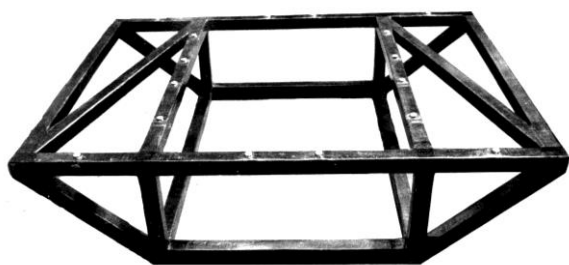


Рис. 6. Ферма базисного блока спутника связи, выполненная из углепластика методом интегральной намотки

Габаритные размеры фермы $1740 \times 1265 \times 410$ мм.

Масса фермы 10 кг.

Ферма базисного блока предназначена для увеличения жесткости панели корпуса, на которой размещены аппаратурные блоки, требующие высокой точности взаимной увязки (в пределах $0,5 \dots 2$ угл. мин) в условиях воздействия факторов космического пространства. Выбор схемы армирования углепластика проводился не только из условия обеспечения максимально возможной жесткости, но и из обеспечения минимального КТР. Все волокна углепластика направлены в продольном направлении трубы, за исключением двух слоев, внутреннего и наружного, являющихся кольцевыми.

Доля углепластика от общей массы фермы составляет 88%.

В лаборатории голографии ДНУ были проведены сравнительные испытания углепластиковой фермы и идентичной ей ферме из алюминиевого сплава на деформативность при температурном воздействии. Для этого была разработана установка, позволяющая измерять линейные размеры с точностью 1 мкм, а угловые деформации – с точностью 2 угл. с, на которой были определены линейные и угловые деформации при неравномерном нагреве фермы. Установлено, что при идентичных испытаниях углепластиковая ферма деформируется в 6,8 раз меньше по линейным размерам и в 6,3 раза меньше по угловым размерам, чем алюминиевая ферма.

В последние годы ГП "КБ "Южное" проводит работы по созданию терморазмеростабильных несущих конструкций оптических приборов высокого разрешения космического применения.

Разработан и изготовлен из углепластика оболочечный корпус сканера с разрешением 1 м, обеспечивающий стабильность положения поверхностей под установку оптических элементов $0,01$ мм в линейных направлениях и 5 угл. с в угловых и состоящий из цилиндрического тубуса диаметром $\sim 0,9$ м, длиной ~ 1 м и корпуса в виде параллелепипеда (размерами $\sim 0,5 \times 0,5 \times 0,6$ м) с цилиндрической пластиной (диаметром $\sim 0,9$ м) на одной из его граней.

Разработана несущая конструкция сканера с внеосевой оптической схемой с разрешением 2,5 м в виде корпуса оболочечного типа размерами $700 \times 600 \times 450$ мм, обеспечивающая линейные перемещения не более $0,01$ мм.

Разработана несущая конструкция сканера с внеосевой оптической схемой с разрешением около 2 м, корпусом ферменного типа размерами $\sim 700 \times 800 \times 600$ мм, линейными перемещениями не более $0,01$ мм.

Разработана КД на несущую конструкцию сканера с разрешением лучше 1 м в виде фермы габаритными размерами $\sim 2500 \times 1600 \times 1180$ мм, обеспечивающей сохранность размеров в линейных направлениях на уровне $0,02$ мм.

Разработан и изготовлен из углепластика оболочечный корпус оптического прибора размерами $\varnothing 580 \times 420$ мм. Проведенные измерения показали стабильность положения посадочных мест под оптические элементы ~ 1 мкм при изменении температуры на 10°C .

Разработаны и изготовлены несущие конструкции крупногабаритных объективов с разрешением 1 м размерами $\sim 2300 \times 1540 \times 1270$ мм. Испытания конструкции на терморазмеростабильность показали сохранность положения площадок под оптические элементы на уровне 5 микрон в линейных направлениях и менее 2 угл. с в угловых направлениях.

Разработана и изготовлена крупногабаритная конструкция размерами $3,4 \times 3,2 \times 1,5$ м из трехслойных панелей с углепластиковыми обшивками для установки оптических приборов. Испытания конструкции на терморазмеростабильность показали сохранность взаимного положения площадок под оптические приборы и приборы системы ориентации на уровне единиц угловых минут в угловых направлениях.

Применение терморазмеростабильных конструкций предусмотрено в космических аппаратах, разрабатываемых в настоящее время. Ведутся проектные работы по КА дистанционного зондирования Земли "Січ-2М". Высокие требования к нестабильности углового положения приборов на уровне нескольких угловых минут для приборов, расположенных на блоке полезной нагрузки, и на уровне десятков угловых минут для приборов, расположенных на аппаратном блоке платформы, вызывают необходимость создания конструкции корпуса блока полезной нагрузки и корпуса аппаратного блока платформы терморазмеростабильными. В связи с этим конструкции аппаратного блока платформы и корпуса блока полезной нагрузки разрабатываются из углепластика. Корпус аппаратного блока платформы состоит из фермы с трубами из углепластика и панели трехслойной конструкции с обшивками из углепластика. Общий вид корпуса аппаратного блока платформы КА "Січ-2М" приведен на рис. 7.

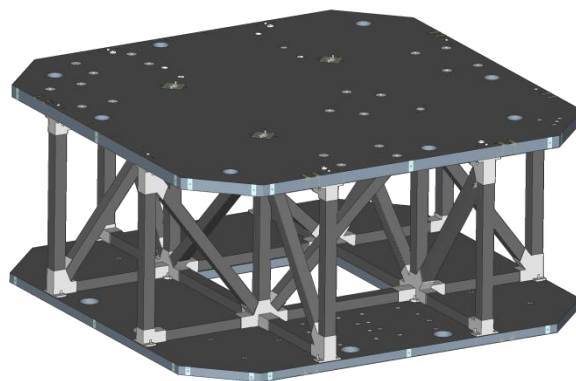


Рис. 7. Общий вид корпуса аппаратного блока платформы КА "Січ-2М"

Корпус блока полезной нагрузки состоит из панелей трехслойной конструкции с обшивками из углепластика. Общий вид корпуса блока полезной нагрузки КА "Січ-2М" приведен на рис. 8.

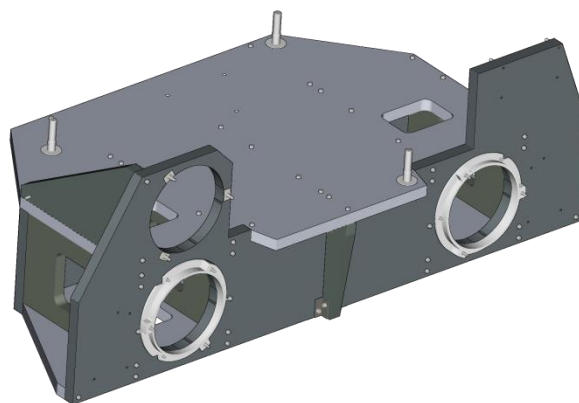


Рис. 8. Общий вид корпуса блока полезной нагрузки КА "Січ-2М"

Выводы

Рассмотренные выше размеростабильные конструкции космических аппаратов обладают высокими техническими характеристиками.

Статья поступила 15.07.2015