

УДК 621.396.67

Н. А. Тестоедов, Г. В. Двирный, М. Ю. Пермяков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ РЕФЛЕКТОРОВ

Рассматривается методика расчета рефлекторов в части температурных деформаций и выбор конструктивно-силовой схемы рефлектора, выполненной с использованием композиционного материала на основе углепластика и представляющую собой многослойную обшивку с сотовым наполнителем.

Ключевые слова: температурная деформация, верификация, фокус, схема армирования (укладки), силовой элемент, расчетная модель.

В состав антенн космического аппарата входят высокоточные размеростабильные рефлекторы из композиционных материалов, к которым предъявляются высокие требования по точностям в различных температурных условиях эксплуатации. Наибольший вклад в отклонения рабочей поверхности от теоретической формы вносят термоупругие деформации, обусловленные влиянием температурного перепада, коэффициентов линейного термического расширения, материалов сотового заполнителя, схем армирования полимерных композиционных материалов.

Условия эксплуатации космической техники предъявляют жесткие и противоречивые требования к физико-механическим и конструкционным свойствам силовых элементов, являющихся основой для крепления измерительных устройств. Главные из них – это минимум массы, высокая прочность и повышенная жесткость, стабильность линейных размеров в широком диапазоне температур, значительный ресурс работы и соответствующая надежность конструкции.

Композиционные материалы на основе высокомолекулярных углеродных волокон имеют высокие жесткостные характеристики и регулируемые коэффициенты линейного термического расширения (КЛТР).

Важным обстоятельством при проектировании несущих конструкций отражателей антенн космического назначения является выбор материала. Все более широкое применение в качестве конструкционных материалов для изделий подобного типа находят композиционные материалы на основе непрерывных волокон (КМ), обладающие уникальным набором физико-механических свойств и технологическими возможностями для их реализации в изделиях.

По многим показателям они значительно превосходят металлы и зачастую являются единственно приемлемыми для создания конструкций с заданными свойствами. Преимущество по удельной прочности и жесткости перед металлами обуславливает также значительную экономическую эффективность их использования в качестве материалов для несущих конструктивных элементов космических приборов.

По оценкам зарубежных специалистов, доставка одного килограмма конструкции в околоземное пространство обходится в сумму от 22 до 44 тыс. долл. Выбор материала значительно влияет на массовое совершенство, а также сильно воздействует на температурные деформации и термоупругое демпфирование.

Наиболее предпочтительными с этой точки зрения являются композиционные материалы на основе эпоксидных смол, армированных углеродными волокнами (углепластики).

Углепластики обладают высокими диссипативными свойствами, слабой зависимостью диссипации от частоты колебаний и высокими собственными резервами демпфирования упругой энергии за счет эластичных прослоек связующего.

Использование конструкционных материалов с малым значением КЛТР позволяет снизить степень воздействия температурных факторов на геометрическую стабильность конструкции. Широкие возможности в этом направлении дают эпокси-углепластики в силу специфического сочетания их физико-механических характеристик. Обладая достаточно высокой жесткостью и прочностью, малой плотностью, углепластики имеют чрезвычайно низкий КЛТР (зачастую отрицательный) в направлении волокон.

Углеродные волокна имеют фактически отрицательный КЛТР, т. е. сжимаются при нагревании. Это свойство в основном и определяет эффективность использования углеродных волокон при конструировании материалов с минимальной температурной деформацией. Углеродная арматура в сочетании с другими волокнами и эпоксидной матрицей позволяет изготавливать конструкционные элементы практически с нулевой термической деформацией.

По сравнению с другими полимерными связующими, применяемыми для изготовления армированных пластиков, эпоксидные смолы обладают рядом преимуществ, которые делают их незаменимыми в качестве связующих для высокопрочных композитов. К таким преимуществам относятся:

- низкая линейная усадка (менее 2 %) и отсутствие низкомолекулярных продуктов отверждения;
- высокая адгезия, превосходящая адгезию большинства других смол, связанная со сравнительно высокой полярностью и способностью эпоксидных групп к химическому взаимодействию с поверхностью многих материалов;
- возможность получения этих смол в различных физическом состоянии – от твердых до низковязких, что позволяет использовать самые различные технологические приемы;
- высокие механические показатели, превышающие показатели других сетчатых полимеров;

- высокие электрические характеристики в широком температурном интервале;
- возможность получения монолитных изделий и конструкций;
- водо- и химическая стойкость.

Волокнистые высокопрочные композиционные материалы представляют собой высоконаполненные ориентированные системы, в которых объемное содержание полимера сравнительно невелико.

В ненагруженном однонаправленном композите, обычно представляемом квадратичной или гексагональной моделью, теоретически минимальное объемное содержание полимера в плотноупакованной квадратичной структуре около 21 %, в гексагональной – 13 %. С учетом того, что эффективная работа монослоя возможна лишь при наличии определенной клеевой прослойки между волокнами, составляющими такую структуру, процентное содержание волокон обычно не превышает 64...66 % от общей массы композита.

Армирующие волокна можно считать совершенно жесткими, так как модуль упругости применяемых неорганических волокон значительно больше модуля упругости полимера.

При отверждении эпоксидного полимера в ходе изготовления композиционного материала, которое происходит обычно при повышенной температуре, объем полимера уменьшается вследствие его усадки, а вязкость быстро нарастает. До момента гелеобразования, пока полимер способен к течению, его объем может уменьшаться за счет уменьшения объема всей системы или образования пор. После гелеобразования течение полимера невозможно и происходит деформация всей системы. Однако при этом деформация полимера ограничена волокнами, что приводит к появлению в полимере внутренних напряжений. Для снятия внутренних напряжений, появившихся в результате формования, производится термоциклирование.

Так как армированные пластики, как правило, содержат большое количество заполнителя, то можно считать, что он образует жесткий скелет, препятствующий деформации полимера, т. е. связующее подвергается всестороннему растяжению. Объемная деформация при этом может составлять несколько процентов.

Таким образом, уже в ненагруженном состоянии полимерная матрица должна выдерживать значительные механические деформации без разрушения и нарушения адгезии на границе с волокном. Как показали микромеханические исследования, эпоксидные смолы значительно лучше других связующих выдерживают подобные условия. Микротрещины появляются в них только после термостарения, в то время как композиты на основе фенольных, кремнийорганических и других связующих растрескиваются уже после изготовления. Кроме того, практически только эпоксидные связующие могут обеспечить монолитность при больших степенях заполнения, необходимых для получения высокопрочных ориентированных композиционных материалов.

Поскольку модули упругости наполнителя и матрицы сильно различаются, для обеспечения монолитности композиционного материала необходимы полимерные матрицы, значения предельных удлинений которых намного превышают среднее удлинение композиционного материала при сохранении достаточных значений прочности.

Особую важность имеет прочность при сдвиге, так как именно малая прочность при сдвиге между слоями является одним из основных недостатков армированных композиционных материалов. При этом предполагается, что адгезионная прочность превосходит прочность полимера, т. е. разрушения по границе раздела не происходит.

Напряжения и деформации для квадратичной и гексагональной укладки волокон являются функцией отношения модулей заполнителя и матрицы и плотности упаковки волокон. Если считать, что полимерная матрица и заполнитель подчиняются закону Гука, то при объемной доле волокна от 0,6 до 0,75 отношение предельных удлинений изменяется от 5 до 15. Если же учитывать нелинейное вязко-упругое поведение полимерной матрицы, то это отношение еще больше возрастает.

Увеличение предельной деформации связующего за счет снижения его модуля упругости и прочности, как это происходит при пластификации, не приводит к повышению прочности пластика, так как при уменьшении модуля упругости матрицы ее предельное удлинение, необходимое для сохранения монолитности, возрастает. Таким образом, «идеальное» связующее должно обладать большим удлинением при высоких значениях модуля упругости и прочности, особенно при сдвиге.

В работе представлена верификация конечно-элементных моделей рефлекторов по результатам температурных испытаний в части температурных деформаций. Диаметр рефлектора 1 250 мм. Поверхность рефлектора – параболоид вращения $y^2 + z^2 = 4Fx$, где фокусное расстояние $F = 420$ мм. Рефлектор представляет собой сотовую конструкцию толщиной 20 мм с обшивками из нескольких слоев углеродной ленты, схемы армирования препрега с толщиной одного слоя 0,3 мм, сотового заполнителя на основе алюминиевого сплава (рис. 1, 2).

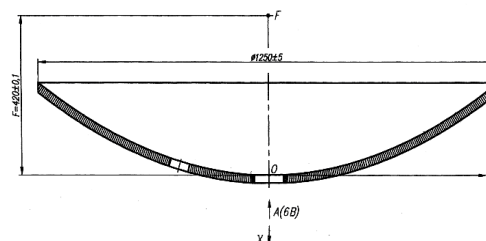


Рис. 1. Общий вид рефлектора

В статье рассмотрены несколько вариантов укладки обшивки:

- 1/0 + 1/60 + 1/–60 углепластик КМУ-4Л;

- 1/0 + 1/90° + 1/90° + 1/0 углепластик КМУ-4Л секторная выкладка со смещением слоев;
- 1/0 + 1/45° + 1/45° + 1/90° углепластик Кулон 500/0,07.

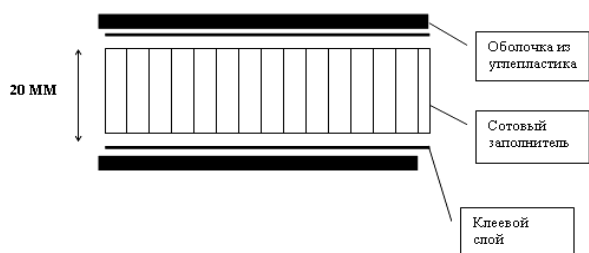


Рис. 2. Структурная схема рефлектора

Слоистая оболочка рефлектора, выполненного со смещением слоев, изготовлена из 4 слоев препрега КМУ-4Л. Каждый из слоев обшивки состоит из уложенных встык друг к другу секторов с одинаковым центральным углом $\beta = 8^\circ$, в каждом секторе одного слоя направления волокон препрега расположены под одинаковым для этого слоя углом $\varphi_n = 0 \dots \pm 90^\circ$ к центральной оси сектора. Стыки секторов каждого последующего слоя смещены относительно стыков секторов предыдущего слоя на угол δ , составляющий часть центрального угла сектора $\delta = 2^\circ$.

Центральный угол развертки конуса β определяется геометрией изделия и рассчитывается, исходя из требуемых физико-механических характеристик обшивки и ширины ленты препрега. Угол смещения стыков секторов δ обеспечивает сдвигу стыков секторов каждого последующего слоя по отношению к предыдущему и определяется из условия технологичности изготовления изделия при возможно минимальном количестве расположений стыков секторов в отдельных слоях обшивки один над другим.

Угол выкладки сотового наполнителя выбирается исходя из соображения создания квазиизотропной структуры.

Изготовление обшивки рефлектора, выполненного секторной выкладкой со смещением слоев, производится следующим образом:

- на однонаправленный волокнистый материал, пропитанный полимерным связующим, накладывается шаблон, имеющий форму сектора с центральным углом β ;
- производится ориентация направления волокон однонаправленного материала к центральной оси шаблона под заданным для первого слоя углом φ_1 ;
- вырезанные сектора первого слоя укладываются встык один к другому на оснастку до заполнения развертки;
- для второго слоя производится ориентация направления волокон однонаправленного материала к центральной оси шаблона под заданным для второго слоя углом φ_2 ;
- второй слой начинается с укладки на первый слой первого сектора второго слоя со смещением од-

ной из сторон на угол δ , составляющий часть центрального угла сектора γ .

Схема армирования рефлектора со смещением слоев показана на рис. 3.

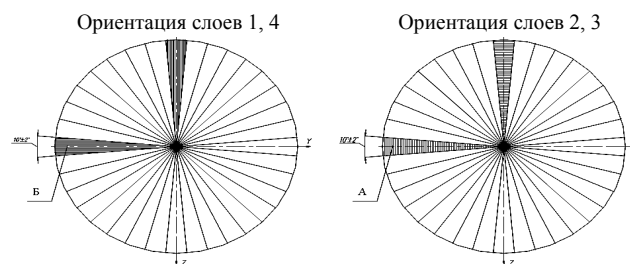


Рис. 3. Схема армирования рефлектора со смещением слоев

Все рефлектора испытывались по одной схеме и методике испытаний.

Испытания проводились в следующем порядке:

- расставили температурные датчики, согласно схеме на рис. 4;
- собрали схему испытаний (рис. 5), с системой тепловой изоляции при помощи двух слоев полиэтилентерефталатной пленки (ПЭТ) и листа из алюминия;
- произвели измерение геометрических параметров рабочей поверхности рефлектора в нормальных условиях. По измеренным 6 реперным знакам на поверхности рефлектора ($d = 500$ мм) построили систему координат;
- произвели нагрев рефлектора до температуры $80 \pm 7^\circ\text{C}$. Начальная скорость нагрева не более $1^\circ\text{C}/\text{мин}$. Выдержали температурный режим 15...20 мин. Контроль температуры нагреваемой поверхности рефлектора осуществили при помощи температурных датчиков;
- произвели измерение геометрических параметров рабочей поверхности рефлектора в нагретом состоянии.

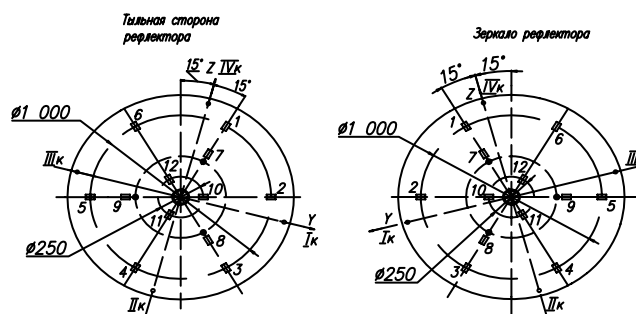


Рис. 4. Схема расстановки температурных датчиков

Погрешность измерений $\pm 0,040$ мм.

Для каждого рефлектора все вышепредставленные операции проводились 3 раза.

Для верификации создана конечно-элементная модель рефлектора с помощью конечного элемента Laminat. Laminat (многослойная пластина) – элемент пластины, учитывающий все внутренние сило-

вые факторы: мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные. Его основное значение – моделирование многослойных композитных материалов. Конечн-элементная модель содержит в себе 2 400 узлов и 2 180 элементов. Модель реализована с помощью пре-процессора MSC/PATRAN. Для анализа расчетной модели использовался метод конечных элементов, реализованный в системе моделирования и конечн-элементного анализа конструкции MSC/NASTRAN. В результате расчета определены перемещения точек относительно первоначального положения. Расчеты выполнены для температурного поля с максимальной температурой 80 °С. Координаты температурных датчиков, полученные в экспериментальных условиях, были учтены при создании модели для аппроксимации температур по математической модели с каждой из сторон и вычисления градиента температур.

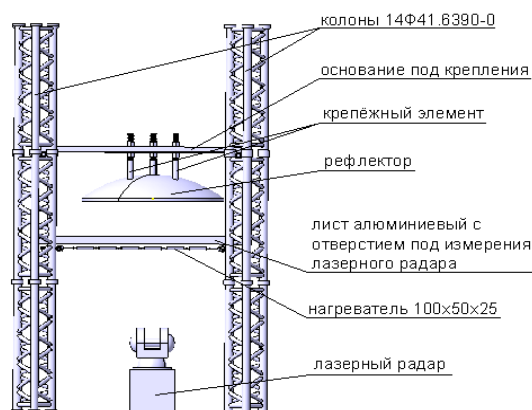


Рис. 5. Схема проведения испытаний (на схеме не показана пленка ПЭТ)

В результате расчетов получены максимальные отклонения от теоретического профиля:

– температурные деформации рефлектора со схемой армирования 1/0 + 1/60 + 1/–60 составили $\delta_x = -0,1029$ мм, $\delta_y = -0,0298$ мм, $\delta_z = -0,0268$ мм;

– температурные деформации рефлектора со схемой армирования 1/0 + 1/90 + 1/90 + 1/0 составили $\delta_x = -0,1061$ мм, $\delta_y = 0,055$ мм, $\delta_z = 0,0541$ мм;

– температурные деформации рефлектора со схемой армирования 1/0 + 1/–45 + 1/45 + 1/90 составили $\delta_x = -0,0933$ мм, $\delta_y = -0,0259$ мм, $\delta_z = -0,0243$ мм.

Для верификации конечной элементной модели с результатами испытаний использовался программный пакет New River Kinematics Spatial Analyze.

Верификация проходила в такой последовательности:

1) по координатам узлов КЭМ, полученных в результате расчета (под воздействием температурного поля), построен теоретический параболоид;

2) по координатам точек, полученных по результатам испытаний под воздействием температурного поля, построен экспериментальный параболоид;

3) из каждой точки теоретического параболоида проведен вектор к поверхности экспериментального параболоида (тем самым определены отклонения каждой точки по всем трем направлениям). Пример верификации результатов расчета с результатами эксперимента показан на рис. 6 (линиями обозначен теоретический параболоид, сеткой экспериментальный).

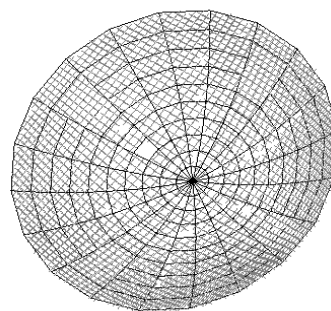


Рис. 6. Верификация результатов расчета с экспериментом

По результатам проведенных исследований конструктивно-технологического исполнения антенн и расчетов рефлектора антенны можно сделать следующие выводы.

При проектировании антенны и отработке технологии изготовления антенн следует обязательно учитывать направление углов армирования и количество слоев для углепластиковых обшивок не только с учетом жесткостных характеристик (определение частот), но и с учетом температурных деформаций.

Отклонение от квазиизотропной структуры армирования $0 \pm 60^\circ$ углепластиковых обшивок приводит к существенным температурным деформациям. Введение дополнительного слоя $0 \pm 60 + 0^\circ$, нарушающего квазиизотропную структуру оболочки, приводит к увеличению деформаций примерно в 2 раза.

Технологические отклонения углов укладки $\pm 2^\circ$ существенно влияют на величину температурных деформаций, которые возрастают на 18 %.

Результаты температурного анализа антенны в температурном поле с максимальной температурой 80 °С показали, что применение препрега КМУ-4Л возможно при создании антенны, однако полученные характеристики являются предельными по своим показателям и практически не дают запаса как по точностным, так и по жесткостным характеристикам. С целью получения конструкции антенны с запасом по жесткости и точности следует переходить на материалы с более высоким модулем упругости, например на углеродные волокна M55J или отечественный материал КУЛОН-500/0,07.

N. A. Testoedov, G. V. Dvirniy, M. Yu. Permyakov

TEMPERATURE DEFORMATION VALUE DEFINITION OF SIZE STABLE REFLECTORS

A calculation method of reflectors with regard to temperature deformation and choice of reflector structurally supportive design, made with the usage of material on the basis of carbon fiber reinforced plastic and which presents multilayer covering with honey comb sandwich is investigated in the report.

Keywords: temperature deformation, verification, focus, armoring arrangement, load-bearing element, design model.

© Тестоедов Н. А., Двирный Г. В., Пермяков М. Ю., 2011

УДК 621.396.4

И. Н. Тульский

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ РАДИОСЕТЕЙ ТИПА 3G И 4G ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ КОМПРЕССИИ МУЛЬТИМЕДИЙНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены альтернативные методы сжатия (компрессии) мультимедийной информации. Произведен сравнительный анализ уже существующих кодеков и алгоритмов с предложенными алгоритмами сжатия и восстановления информации в современных радиосетях.

Ключевые слова: радиосети, сжатие, мультимедиа, вейвлет, чирплет, кодек.

Сфера услуг, предоставляемых абонентам мобильных радиосетей, разнообразна и постоянно пополняется. Для качественной передачи информации в беспроводной сотовой связи необходимо рассмотреть возможность использования методов сжатия (компрессии) как с потерями, так и без потерь.

Применяемые в настоящее время методы компрессии по большей своей части и в силу стандартов, навязанных производителями, не соответствуют стандартам для организации скоростного потока передачи информации. Возможность передачи больших объемов цифровых данных, в том числе аудио- и видеоинформации, не учитывает специфику каналов и устройств мобильной связи: низкую помехоустойчивость, малые объемы памяти, низкие вычислительные возможности терминала.

Основными задачами беспроводной сотовой связи являются повышение эффективности и улучшение эксплуатационных характеристик бортовой аппаратуры доставки мультимедийной информации, упрощение программных алгоритмов обработки информации в терминалах.

Таким образом, проблема повышения эффективности организации сервисов по обработке и доставке мультимедийной информации абонентам мобильной связи в современных радиосетях имеет большое значение. Для ее разрешения необходима разработка альтернативных алгоритмов обработки данных, соответствующих специфике мобильных сетей и терминалов связи, для чего решаются следующие задачи:

– анализ существующих технических решений по сжатию мультимедийной информации, применяемых в беспроводных системах связи;

– обзор предлагаемых решений по обеспечению эффективного сжатия мультимедийной информации, учитывающего специфику радиоканалов, в частности сетей мобильной связи третьего и четвертого поколений;

– оценка необходимости использования новых методов обработки и сжатия информации;

– исследование математического аппарата чирплет-преобразований применительно к обработке мультимедийной информации и сжатия данных с допустимыми потерями;

– разработка алгоритмов сжатия статичных изображений, видео- и аудиопоследовательностей на основе чирплет-преобразования;

– аналитическое и имитационное моделирование прохождения сигнала по радиоканалу с возникновением характерных ошибок (случайных битовых ошибок, потери пакета данных, потери синхронизации потока).

На основании вышеизложенного, в качестве наиболее универсального метода и простого математического аппарата, схожего по свойствам с математическим аппаратом вейвлет-преобразований, взято адаптивное чирплет-преобразование.

Для анализа нестационарных процессов, в которых информативным является сам факт изменения частотно-временных характеристик сигнала (речи, музыки, изображения), требуются базисные функции, способные выявлять как частотные, так и временные характеристики, т. е. обладающие частотно-временной локализацией [1]. Одним из способов решения данной задачи является использование математического аппарата чирплет-функций, в частности чирплет-