

4540698

На правах рукописи

УДК 621.774

Сумин Юрий Валерьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ
СОТОВЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТОВ.

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ю. Сумин

Москва - 2000 г.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:

Академик РАЕН
Доктор технических наук, профессор
БУЛАНОВ И.М.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор
ПОПОВ Б.Г.

Кандидат технических наук
нач. отделения ЦНИИСМ
УФИМЦЕВ А.И.

Ведущее предприятие:

ОАО "Композит"

Защита состоится " " 2000 года на заседании
диссертационного совета " " в Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана.
2-ая Бауманская ул. Москва

С диссертацией
Баумана.

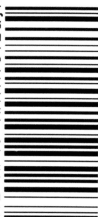
Ваш отзыв
просим направить

Автореферат

УЧЕНЫМ
ДИССЕРТАЦИОННОМУ
Академик
Академик
Доктор технических наук

А.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1570698

Сумин Ю.В. Исследование те

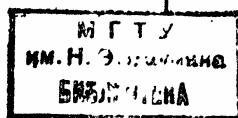
Актуальность работы. На современном этапе развития ракетно-космической отрасли пилотируемые космические комплексы, космические межпланетные аппараты и системы спутниковой связи занимают важное место в космических программах ряда высокоразвитых стран. В связи с потребностью использования телекоммуникационных спутниковых систем, спутников ретрансляторов, создания различных энергоустановок, преобразующих солнечное излучение в электроэнергию, возрос интерес к параболическим конструкциям, работающим в условиях открытого космоса. К таким конструкциям предъявляются ряд жестких требований по геометрической точности, «гладкости» поверхности, размеростабильности при нагреве, высокой проводимости отражающей поверхности (для антенн), устойчивости к ультрафиолетовому излучению, атомарному кислороду и прочим факторам космического пространства.

Эти требования, за исключением размеростабильности при нагреве, первоначально удовлетворялись изготовлением металлических зеркал - штампованных стальных или литых алюминиевых. Однако, в последнее время для этих целей все чаще стали применять композиционные материалы, позволяющие достаточно просто, с меньшими затратами, изготавливать различные параболические конструкции, удовлетворяющие указанным выше требованиям и обладающие помимо этого рядом дополнительных преимуществ. К таким преимуществам относятся:

1. меньшая масса конструкции по сравнению с традиционными вариантами (удельная масса конструкции — не более $2-2,5 \text{ кг/м}^2$);
2. высокая размеростабильность при нагреве (у углеродных композиционных материалов коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) $\alpha = 1...3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$);
3. возможность варьирования свойствами материала с целью получения требуемых характеристик, а также возможность изготовления таких конструкций в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Обеспечение требований по точности геометрии, является достаточно сложной технологической задачей, т.к. на сегодняшний день пока нет готовых технологических решений и отдельные этапы технологического процесса являются недостаточно изученными. В частности, мало изучены аспекты процесса формообразования параболического сегмента при наличии в нем начальных технологических напряжений, влияние на форму напряжений, возникающих при нагреве, и получение требуемой геометрической точности изделия. Также во многих случаях требуется оценивать предельные радиусы изгиба плоских многослойных заготовок при деформировании их по параболической поверхности.

Выявленные проблемы существенно усложняют как конструкторские, так и технологические работы по созданию параболических конструкций из композиционных материалов (КМ). Таким образом, при проектировании, изготовлении и отработке элементов конструкций из КМ необходимо располагать расчетными методиками, позволяющими моделировать процессы деформирования ма-



материала и элементов конструкций, обоснованно подходить к выбору схем армирования, других конструктивных и технологических параметров.

По этим причинам повышение геометрической точности изготовления трехслойных сотовых конструкций (ГСК) двойной кривизны из КМ, является актуальной научно-технической проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение. Решение данной проблемы позволит существенно сократить сроки и затраты на обработку ТСК двойной кривизны из композиционных материалов.

Цель работы. Уменьшение времени и затрат на стадии проектирования и технологической обработки производства, повышение точности изготовления трехслойных сотовых конструкций двойной кривизны за счет использования разработанной методики расчета размерных отклонений конструкции от заданного теоретического контура в процессе изготовления.

Научная новизна работы.

- разработана математическая модель определения размерных отклонений трехслойной сотовой конструкции, представляющей собой оболочку вращения, с учетом начальных сборочных напряжений в несущих слоях (НС) и температурных напряжений, возникающих при технологическом режиме нагрева. Модель теоретически иллюстрирует существование определенной схемы армирования НС, при которой достигается необходимая точность изготовления конструкции;

- разработана модель расчета предельных технологических радиусов изгиба плоских круглых листовых заготовок при деформировании по поверхности двойной кривизны с учетом схем армирования. Теоретически показано, что при варьировании углом укладки армирующего заполнителя можно увеличить предельные технологические радиусы изгиба без потери устойчивости;

- разработана оценочная модель расчета изменения радиуса кривизны многослойных оболочек при формовании на оснастке, образованной поверхностью вращения.

Практическая значимость.

Разработана модель, позволяющая на этапе проектирования определять размерные отклонения трехслойных сотовых конструкций параболической формы в процессе изготовления. С помощью разработанной модели возможно корректировать конструкторско-технологические параметры изделия (схемы армирования, толщины НС, высоту панели, характеристики материала и пр.), а также геометрические параметры оснастки в соответствии с заданными допусками. С помощью модели для конкретных схем армирования, с учетом начальных и температурных напряжений, возможно отыскивать такие схемы армирования, при которых отклонения изделия от формы оснастки будут минимальными. Использование данной модели позволяет значительно сократить временные и

материальные затраты на проектирование и технологическую обработку таких изделий.

Разработана модель, позволяющая определить изменение кривизны параболической обшивки после формования с нагревом на оправке и заранее прогнозировать возможные технологические напряжения при склеивании трехслойной конструкции.

Получена зависимость предельного радиуса изгиба плоского многослойного листа по параболической поверхности, с помощью которой на этапе проектирования можно определить толщину, габариты и схему армирования, при которых не произойдет потери устойчивости и гофрения листа.

Апробация результатов работы.

Результаты работы доложены на 15-ой Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 1999; тезисы доклада опубликованы на 20-ой международной конференции и выставке «Композиционные материалы в промышленности» (Славполиком-2000), г. Ялта, 2000; международной конференции «Перспективные материалы» г. Киев, 1999; основные выводы и результаты работы заслушивались и обсуждались на научно-технических семинарах в РКК «Энергия».

Основные результаты проведенных исследований и разработанные модели использованы на РКК «Энергия» при создании зеркала-отражателя солнечной газотурбинной установки (СГТУ) и на этапе технологической обработки перспективной конструкции параболической антенны из КМ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа изложена на 132 страницах машинописного текста, включая введение и основные выводы. Работа иллюстрирована 59 рисунками, содержит список литературы из 36 наименований и 2 приложения.

В первой главе рассмотрены технологические особенности изготовления трехслойных сотовых конструкций двойной кривизны с несущими слоями из углепластика. По литературным источникам проведен обзор и анализ существующих способов получения ТСК двойной кривизны из КМ; рассмотрены и проанализированы модели и методы расчета подобных конструкций с учетом влияния зависимости свойств материала от температуры.

Проведенный анализ технологического процесса изготовления показал, что основной технологической особенностью производства ТСК как одинарной так и двойной кривизны с НС из композиционных материалов, является трудность получения требуемой геометрической точности изделия в процессе изготовления. Основными факторами, влияющими на точность воспроизведения формы, являются начальные сборочные напряжения в несущих слоях, внутренние напряжения, возникающие в результате нагрева конструкции при склеивании и тепловые расширения самой оправки. Возникновение начальных напря-

жений обусловлено несоответствием кривизн отформованных НС и оправки, а также наличием различных зазоров при сборке. Внутренние температурные напряжения в конструкции обусловлены температурным расширением материала НС с последующим склеиванием с сотовым наполнителем и охлаждением.

Проанализированы различные варианты реализации технологии изготовления трехслойных сотовых конструкций двойной кривизны. Установлено, что технологические процессы, включающие в себя формование одного или двух НС, непосредственно на этапе сборки конструкции, не обеспечивают необходимого качества поверхности. Способ безматричного формования, где в качестве основного формообразующего элемента выступает внутренний каркас конструкции, в данном случае, очень трудоемок и не позволяет достичь необходимой точности. Учитывая накопленный опыт изготовления и ряд ограничений, возникающих при конструировании и производстве углепластиковых ТСК двойной кривизны, применяемых в качестве конструкций антенн, отражателей, концентраторов, показано, что наиболее рациональной является технология, которая позволяет использовать в качестве НС предварительно отвержденные заготовки с необходимым поверхностным покрытием. В конструкциях с незначительной кривизной, когда на углепластиковых слоях необходимо иметь высокоотражающее покрытие, НС могут быть плоскими. Такой подход связан, в первую очередь, с технологическими особенностями нанесения на углепластиковые листы тонкого (0.1 - 0.2 мм), однородного подслоя с низкой степенью шероховатости, пригодного для нанесения различных отражающих слоев.

В результате анализа предварительного расчета ТСК при тепловом воздействии было установлено, что неучет зависимости свойств материала от температуры приводит к качественно неверным предположениям о деформировании конструкции. Таким образом, учет в расчетах зависимости свойств материала от температуры в композитных конструкциях обязателен. В связи с этим актуальной является задача экспериментального исследования зависимости свойств композиционных материалов от температуры.

Обзор и анализ существующих моделей расчета в литературе и отдельных научных работах показали, что необходимо разработать модели расчета, учитывающие специфические свойства КМ материалов, конструкторско-технологические параметры и особенности технологического процесса изготовления. Наиболее интересной, с точки зрения технологических вопросов, считается задача определения размерных отклонений изделия от оснастки после склеивания. Создание расчетных методик, позволяющих оценивать отклонения формы композитных элементов от формы оснастки, будет способствовать сокращению сроков и стоимости отработки технологии их изготовления.

На основании выше изложенного была сформулирована цель работы, которая заключалась в следующем:

Снизить время и затраты на стадии проектирования и технологической отработки производства, повысить точность изготовления трехслойных сотовых конструкций двойной кривизны за счет использования разработанной методики

расчета размерных отклонений конструкции от заданного теоретического контура в процессе изготовления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать методику оценочного расчета предельной кривизны изгиба плоских круглых многослойных заготовок из КМ на поверхности двойной кривизны с учетом толщины и схем армирования материала.

2. Разработать методику определения начальных напряжений в трехслойной композитной конструкции.

3. Разработать теоретическую модель определения изменения формы параболической ТСК от заданного теоретического контура при различных вариантах реализации технологического процесса.

4. Произвести экспериментальную проверку разработанных методик на образцах и внедрить технологический процесс изготовления параболических трехслойных сотовых конструкций в опытно-промышленное производство.

Вторая глава посвящена разработке теоретических моделей сформулированных задач и анализу результатов расчетов.

В процессе создания из плоских отформованных листов полых многослойных панелей двойной кривизны приходится деформировать листы по заданной поверхности. В этом случае при обжатии листов в них возникают внутренние сжимающие напряжения, которые могут привести к потере устойчивости, сопровождающейся гофрированием и образованием складок, что во многих случаях является недопустимым. Кроме этого, после окончательного формообразования изделия, наличие в материале высоких остаточных напряжений может привести к изменению формы и короблению конструкции после снятия с оправки.

Для решения этой задачи была разработана теоретическая модель, основанная на приближенной оценке предельной кривизны осесимметричного изгиба круглого многослойного листа. Форма параболической поверхности (рис.1.) по которой происходит изгиб многослойного листа задается в виде уравнения:

$$y = -\frac{1}{2}Kr^2; \quad y' = -Kr, \quad (1)$$

где K - параметр характеризующий кривизну параболической поверхности

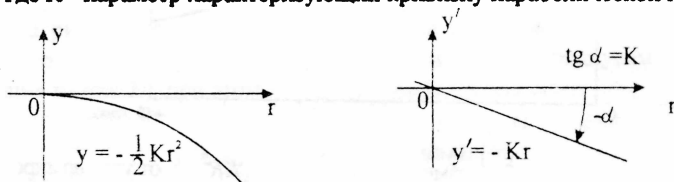


Рис.1. Форма параболической поверхности оснастки

Задача устойчивости решалась в вариационной постановке с учетом полученных физических соотношений для изгиба круглого листа.

В результате была получена зависимость предельного радиуса кривизны параболической поверхности, при котором не произойдет потери формы или гофрения материала при обжатии:

$$K = \min_{(n)} \frac{3}{R^2} \sqrt{\frac{2}{B_{22}} \left\{ \frac{3D_{11}}{n^2} + \frac{D_{22}[(2n^2 - 1)^2 + 2]}{n^2} - \frac{D_{12}(4n^2 - 6)}{n^2} + 9D_{33} \right\}} \quad (2)$$

где D_{11} , D_{12} , D_{22} , D_{33} – изгибные жесткости многослойного пакета, соответственно принятым в литературе обозначению в осях 1-1, 1-2, 2-2, 3-3;

B_{22} – мембранная жесткость многослойного пакета;

n – число полуволн при потере устойчивости;

R – габаритный радиус круглой пластины.

На рис.2 для частного случая, когда анизотропный пакет набран из слоев углепластика КМУ-4Л с углами армирования $\pm\varphi$, пунктирными линиями показаны зависимости безразмерного параметра $KR^2/3h$ (h – толщина пакета) от угла армирования $\pm\varphi$ при значениях числа полуволн $n=1, 2, 3$. Сплошной линией показана огибающая, дающая минимальные значения параметра $KR^2/3h$. В данном частном случае наибольшая предельная кривизна параболоида обеспечивается при схеме укладки $\pm 15^\circ$.

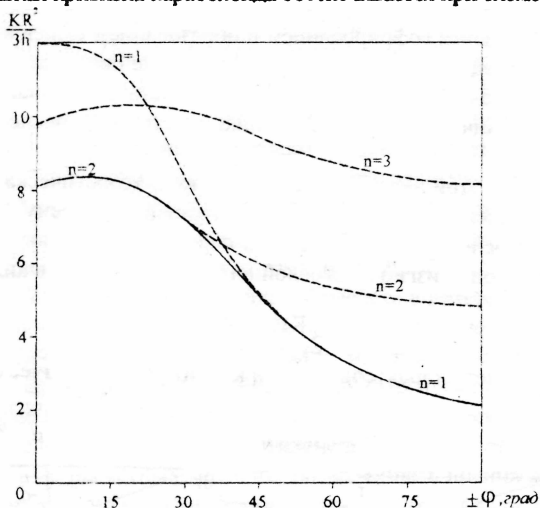


Рис.2. Зависимость безразмерного параметра $KR^2/3h$ от угла армирования.

Для изотропного материала с учетом подстановок и математических упрощений при $n=1$ данная зависимость примет вид:

$$K = \frac{3h}{2R^2} \sqrt{\frac{(21-5\nu)}{3}} \approx 3,8 \frac{h}{R^2} (\text{при } \nu = 0,3), \quad (3)$$

где h — толщина пакета;

ν — коэффициент Пуассона.

Как следует из (3), для изотропных пластин предельные кривизны не зависят от жесткостных характеристик, а определяются относительной тонкостенностью пластины (h/R) и габаритным размером R .

Для анизотропных пластин, как следует из зависимости (2), предельная кривизна параболоида зависит от жесткостных характеристик. Следовательно, рациональным управлением структурой укладки пакета можно добиться увеличения предельной кривизны.

Для увеличения предельной кривизны изгиба многослойного листа можно набирать его из отдельных, предварительно изогнутых пластин (фацет). Полученное соотношение можно использовать и для отдельных фацет. В этом случае под R следует понимать максимальный радиус вписанной окружности. Так как последний существенно меньше радиуса пластины, то из формулы (2) следует, что предельная кривизна параболоида K в этом случае увеличивается.

Для разработки методики определения начальных напряжений параболическая ТСК (рефлектор) аппроксимировалась ортотропным сферическим сегментом с постоянными жесткостями.

Предварительно была произведена оценка изменения кривизны обшивки после формования, которое происходит при повышенной температуре. После снятия с оправки и остывания кривизна обшивки изменяется. Для оценки этого изменения использовалась безмоментная теория оболочек, т.е. решалась следующая задача: определялись деформации сферического сегмента (по безмоментной теории) при изменении его температуры от T_0 до T ($\Delta T = T - T_0 = \text{const}$ по всему объему сферического сегмента).

В процессе формования обшивка имеет форму сферического сегмента радиусом R , с углом полураствора θ_0 и опорным радиусом $r_0 = R \sin \theta_0$ (сплошная линия на рис.3.) После снятия с оправки она принимает форму сферического сегмента радиуса R^* с углом полураствора θ^* и опорным радиусом r^* (пунктирная линия на рис.3.), при этом:

$$\left. \begin{aligned} r_0^* &= r_0 + u_r = (1 + \varepsilon_2^{\text{обш}}) R \sin \theta_0 \\ R^* &= \frac{r_0^*}{\sin \theta_0} = (1 + \varepsilon_2^{\text{обш}}) R \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

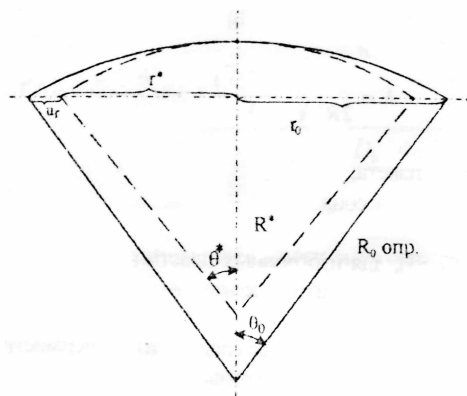


Рис.3. Изменение формы обшивки после снятия с оправки ($\varepsilon_2^{\text{обш}} > 0$)

где R - радиус срединной поверхности обшивки;

$\varepsilon_2^{\text{обш}}$ - деформация обшивки в окружном направлении, выражаемая следующим соотношением:

$$\varepsilon_2^{\text{обш}} = \frac{T_{1T}}{(B_{11} + B_{12})}, \quad (5)$$

где T_{1T} - температурная составляющая погонного окружного усилия;

B_{11}, B_{12} - мембранные жесткости многослойного пакета.

Для определения размерных отклонений многослойных оболочек вращения из КМ в ходе технологического склеивания была разработана теоретическая модель, основанная на расчете ТСК с помощью метода конечных элементов (МКЭ) на ЭВМ. Конструкция аппроксимировалась коническими элементами с двумя узловыми точками по границам элемента, имеющих три степени свободы: нормальное (w) и касательное (u) перемещения и угол поворота (ω) (рис. 4).

Для данного элемента были определены деформационные соотношения, произведена аппроксимация перемещений на отдельном конечном элементе, сформулированы физические соотношения упругости с учетом начальных и температурных напряжений.

Общее решение формулировалось, исходя из принципа возможных перемещений, который заключается в том, что приращение работы совершаемой внутренними силами, равно приращению работы, совершаемой внешними силами на бесконечно малых перемещениях, удовлетворяющих заданным граничным условиям в перемещениях (возможных перемещениях).

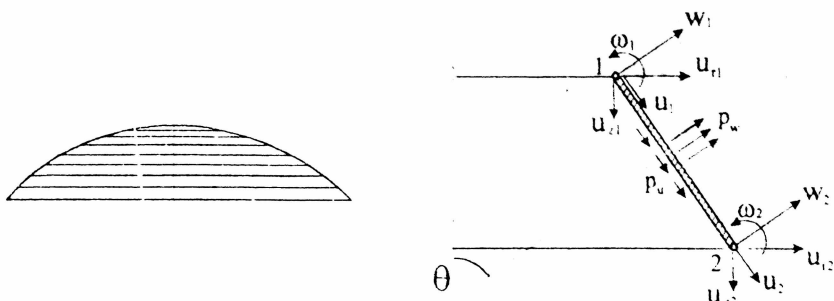


Рис.4. Аппроксимация оболочки кольцевыми коническими элементами

В развернутом виде для данной задачи принцип возможных перемещений записывается в виде:

$$2\pi \int_0^t (\delta \varepsilon^T N - \delta U^T p) r dx - 2\pi \delta q^T t = 0, \quad (6)$$

где

$N = [N_1, N_2, M_1, M_2]^T$ - вектор внутренних силовых факторов

$\delta \varepsilon = [\delta \varepsilon_1, \delta \varepsilon_2, \delta \varepsilon_3, \delta \varepsilon_4]^T$ - вектор деформаций от работы внутренних сил;

$\delta U = [\delta u, \delta w]^T$ - вектор перемещений от работы внешних сил;

$p = [p_n, p_t]^T$ - вектор-столбец распределенных поверхностных касательных и нормальных сил (рис.3);

$\delta q = [\delta u_{r1}, \delta u_{z1}, \delta \omega_1, \delta u_{r2}, \delta u_{z2}, \delta \omega_2]^T$ - глобальные узловые степени свободы;

$t(6 \times 1)$ - вектор-столбец обобщенных узловых реакций.

Стыковка элементов при расчете производилась по глобальным узловым перемещениям, при этом угол поворота θ изменялся при переходе к соседнему элементу. Исходя из данных определений, была составлена программа вычисления значений нормального и касательного перемещений w и u , и отклонения формы конструкции. Значение среднеквадратического отклонения (СКО) рассчитанного контура от заданного теоретического определялось как:

$$\Delta_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [w(\theta_i)]^2}, \quad (7)$$

где n - число точек вдоль меридиана, в которых рассчитывались перемещения.

В третьей главе описываются используемые при исследованиях оборудование, аппаратура и измерительные инструменты, приводятся методики выполнения экспериментов, результаты экспериментальных исследований и сравнение их с теоретическими зависимостями.

Цель экспериментальных исследований состояла в оценке отклонения реального профиля трехслойной параболической конструкции (рефлектора) от номинального (теоретического) контактным способом на координатно-измерительном стенде.

Определение аппликат точек поверхности объекта измерений производилось методом сравнения. В качестве измерительного устройства, применялись концевые меры и два индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленные на специальной передвигаемой каретке.

Для данной схемы измерений, предварительно была проведена оценка систематической и случайных погрешностей измерения. Предельная погрешность измерения на спроектированной и изготовленной установке не превышает 52 мкм.

Для каждого меридионального профиля при повороте на угол $\varphi=15^\circ$ производилось измерение аппликат поверхности рефлектора, а затем рассчитывалось среднее квадратическое отклонение от заданного теоретического контура параболы, которое по условиям точности не должно превышать установленной величины СКО для данного изделия. По результатам замера были построены усредненные профили поверхности рефлектора в меридиональном сечении.

Для получения уточненных данных о зависимости изменения КЛТР однонаправленных углепластиковых материалов от температуры были проведены экспериментальные исследования образцов из углепластика. Эксперимент проводился для определения КЛТР однонаправленного углепластика КМУ, изготовленного из углеродной ленты марок ЭЛУР толщиной 0,08 мм и ЛУ-П с толщиной 0,1, вдоль и поперек укладки армирующего заполнителя в диапазоне температур от +20 до +200 °С. Определение зависимостей проводилось на лабораторном стенде С1.4920, предназначенном для исследования коэффициента линейного термического расширения в диапазоне температур от +25 до +1000 °С. По результатам измерений установлено, что на исследуемом диапазоне температур изменение КЛТР в продольном направлении составило более чем в четыре раза, в поперечном - в 1,5 раза относительно начальной температуры измерений.

Максимальная относительная погрешность единичного измерения для всего исследуемого диапазона температур на данной установке оценена величиной $\pm 5\%$.

Для расчета по разработанной модели в качестве данных были приняты параметры конструкции рефлектора $\varnothing 1200$ мм и изготовленных для проверки точности теоретической модели 3-х трехслойных сотовых образцов параболической формы $\varnothing 640$ мм. Склеивание рефлектора $\varnothing 1200$ мм производилось без нагрева, склеивание трехслойных параболических образцов происходило с нагревом до 140 °С.

Рефлектор $\varnothing 640$ представляет собой трехслойную сотовую конструкцию параболической формы с НС, состоящих из 4-х монослоев углепластика. Несу-

шие слои первого рефлектора имели схему армирования $[0/90/90/0]$; второго - $[0/-70/+70/0]$, третьего- $[0/-45/+45/0]$. Толщина ЛС после формования составляла 0,45...0,48 мм. Толщина монослоя (h) в расчетах принималась равной 0,12мм. Заполнитель - алюминиевые соты высотой $H=10$ мм. Оправка аппроксимировалась сферическим сегментом с внутренним радиусом $R=1100$ мм и углом полураствора $\theta_0=16^\circ$.

Так как формование ЛС и последующее склеивание конструкции происходит при повышенных температурах, соответственно 175°C и 140°C , в расчетах учитывались зависимости свойств углепластика от температуры.

Как видно из представленных зависимостей нормального перемещения (w) для различных схем армирования после склеивания рефлектор не будет иметь необходимую заданную точность параболического контура. Это объясняется наличием начальных и температурных напряжений, возникающих в ЛС при остывании изделия после нагрева. В зависимости от схемы армирования рефлектор может иметь как большую кривизну (схемы армирования $[0/-45/+45/0]$; $[0/-30/+30/0]$; $[0/-60/+60/0]$) после склеивания так и меньшую (схема армирования $[0/90/90/0]$) относительно заданной (рис.5).

Для выявления рациональных схем армирования ЛС были рассчитаны зависимости максимальных ($w_{\max}$), минимальных нормальных ($w_{\min}$) перемещений поверхности рефлектора и значения среднеквадратического отклонения для всех схем армирования в диапазоне $0^\circ \dots 90^\circ$ с интервалом в 1° (рис.6).

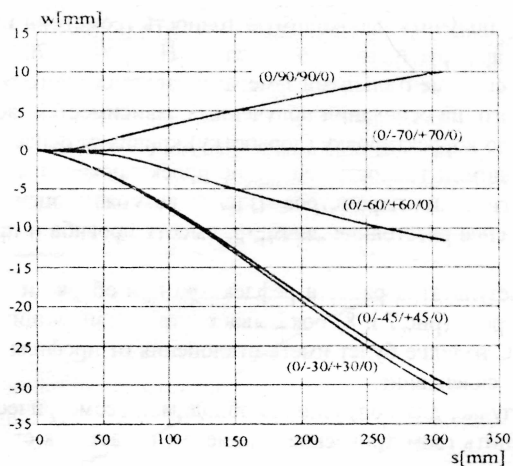


Рис.5. Расчетные зависимости нормальных перемещений (w) рефлектора после склеивании с нагревом при 140°C

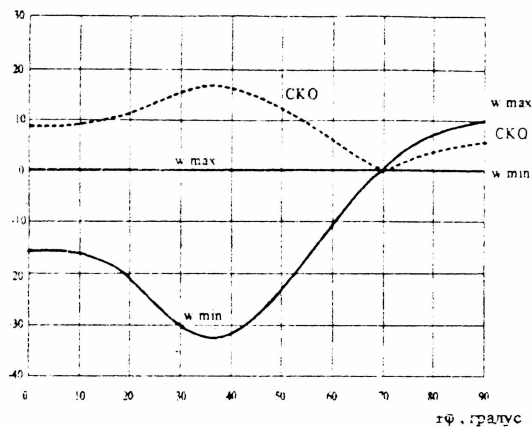


Рис.6. Расчетные зависимости максимальных (W_{max}), минимальных (W_{min}) перемещений и СКО поверхности при различных углах армирования после склеивании с нагревом при 140°C

По результатам расчета видно, что для схемы армирования $[0/-70/+70/0]$ в этом случае удается получить минимальные величины нормальных перемещений и СКО (рис. 6). Т.е. при данной схеме реализации технологического процесса возможно получить необходимую точность геометрии изделия, применяя схему укладки армирующего заполнителя в НС $[0/-70/+70/0]$. Данный вывод подтвержден экспериментальными замерами изготовленного рефлектора.

Кроме этого, на основании полученных зависимостей, возможно произвести необходимую корректировку (доработку) кривизны оснастки для получения изделия необходимой точности. На этапе проектирования и выбора конструкторско-технологических параметров изделия возможно оценить кривизну конструкции (фокусное расстояние, диаметр, высоту прогиба и пр.) после изготовления.

Анализ результатов расчета рефлектора при сборке и склеивания конструкции без нагрева (рис.7 и 8) показывает, что при имеющихся начальных напряжениях в НС изделие будет иметь отклонения от профиля оправки, на которой происходит склеивание.

В этом случае, для получения необходимой геометрической точности необходимо изменить геометрические параметры оснастки в сторону уменьшения или увеличения кривизны в соответствии с расчетными данными перемещений. При технологической отработке данного изделия удалось достичь требуемых значений СКО формы.

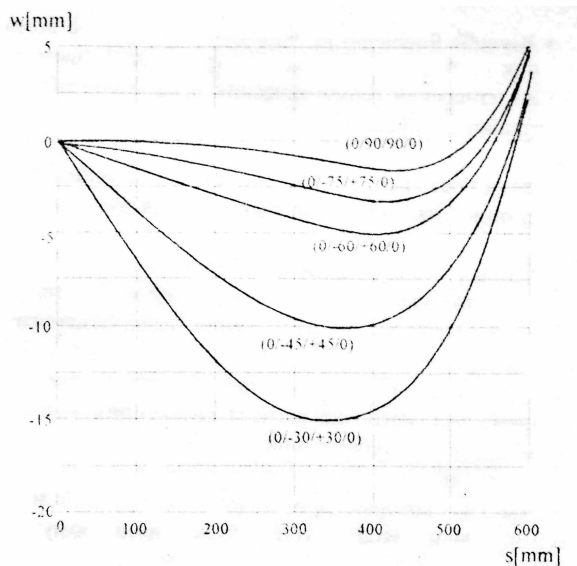


Рис.7. Расчетные зависимости нормальных перемещений (w) рефлектора после склеивания без нагрева

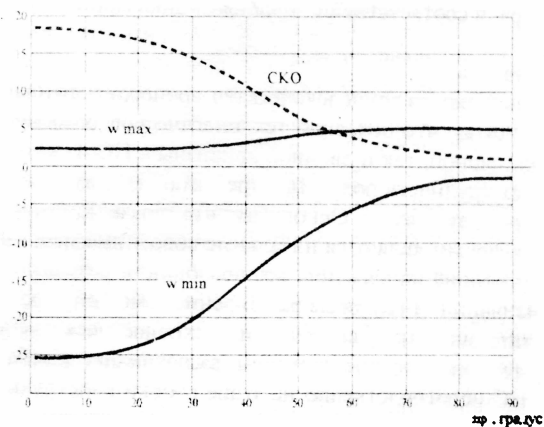


Рис.8. Расчетные зависимости максимальных (w_{max}), минимальных (w_{min}) перемещений и CKO поверхности при различных углах армирования после склеивания без нагрева

Сравнение профилей оболочки рассчитанных на ЭВМ с помощью разработанной модели показало хорошую сходимость с полученными экспериментальными данными измерения геометрических параметров образцов. Максимальная ошибка разработанной методики расчета не превышает 7 %.

Четвертая глава посвящена разработке технологических рекомендаций и внедрению разработанных методик в производство для изготовления параболических ТСК.

Результаты данных исследований апробировались в РКК «Энергия» на конкретных этапах технологической обработки и изготовления секторов солнечной газотурбинной установки и изготовления перспективного параболического рефлектора для антенны.

Для выбора рационального деления поверхности сектора на отдельные facets СГГУ применялась методика расчета внутренних напряжений и предельных технологических радиусов изгиба плоских листовых заготовок. С помощью методики произведено рациональное разбиение поверхности сектора на отдельные элементы НС, которые при сборке конструкции и последующем склеивании, обеспечивали необходимую параболическую форму.

При изготовлении трехслойного сотового рефлектора для антенны на этапе технологической обработки, с учетом расчетных данных о деформировании изделия после склеивания, удалось произвести доработку формы оснастки на необходимую величину для обеспечения заданной точности. В результате, при склеивании без нагрева, конструкция имела необходимую точность параболического контура в соответствии с заданными допусками.

Общие выводы.

1. Проведенный анализ технологического процесса изготовления ТСК двойной кривизны показал, что основной технологической особенностью производства ТСК как одинарной, так и двойной кривизны с НС из композиционных материалов является трудность получения требуемой геометрической точности изделия в процессе изготовления. Основными факторами влияющими на точность воспроизведения формы являются начальные сборочные напряжения в несущих слоях (НС), внутренние напряжения возникающие в результате нагрева конструкции при склеивании, и тепловые расширения самой оправки.

2. В результате анализа существующих технологических способов было установлено, что технологические процессы, включающие в себя формование одного или двух НС непосредственно на этапе сборки конструкции, не обеспечивают необходимого качества поверхности. Учитывая накопленный опыт изготовления и ряд ограничений, возникающих при конструировании и производстве углепластиковых ТСК двойной кривизны, для производства конструкций антенн, отражателей, концентраторов, наиболее рациональной является технология, которая позволяет использовать в качестве НС предварительно отвержденные заготовки с необходимым поверхностным покрытием.

3. Основываясь на упрощенной модели изгиба плоского круглого листа по параболической поверхности, получена зависимость предельного технологического радиуса изгиба, с помощью которой, на этапе проектирования, возможно определить толщину, габариты и схему армирования, при которых не произойдет потери устойчивости НС. Для симметричных схем армирования $\pm\phi$ было установлено, что максимальный радиус изгиба достигается при укладке армирующего заполнителя с углом $\pm 15^\circ$. Для увеличения предельной кривизны многослойных листовых заготовок предложено набирать их из отдельных, предварительно изогнутых фацет.

4. С помощью безмоментной теории получена теоретическая зависимость для определения изменения радиуса кривизны НС после формования на оправке. Данные расчеты позволяют прогнозировать начальные напряжения в конструкции при сборке и последующем склеивании.

5. С использованием теоретических основ МКЭ разработана модель, позволяющая рассчитывать размерные отклонения формы трехслойной сотовой конструкции в процессе технологического склеивания с учетом начальных и температурных напряжений, а также корректировать схемы армирования в соответствии с заданными допусками. Данная модель учитывает также зависимость свойств материала от температуры.

6. Разработанной модель позволила установить, что при склеивании конструкции с нагревом при схеме армирования НС из углепластика 0/-70/+70/0 возможно получить необходимую геометрическую точность. Для склеивания конструкции без нагрева при наличии начальных напряжений в НС изделие не принимает форму оправки. Для получения необходимого радиуса кривизны с помощью разработанной модели удалось рассчитать необходимую кривизну оправки, при которой изделие приняло заданный контур.

7. Проведенные экспериментальные исследования по измерению геометрических параметров изготовленных образцов и сравнение данных с теоретическими зависимостями показали, что погрешность расчетных данных полученных с помощью модели не превышает 7%.

8. На основе проведенных исследований разработаны технологические рекомендации по изготовлению трехслойных сотовых конструкций двойной кривизны из композиционных материалов. Результаты исследований и разработанные модели были применены при технологической отработке и изготовлении зеркала-концентратора солнечной энергии, и параболической антенны на предприятии РКК «Энергия», что позволило существенно снизить временные, и материальные затраты на подготовку производства и отработку технологии изготовления этих конструкций.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Алямовский А.И., Копыл Н.И., Сумин Ю.В. Разработка и исследование технологии изготовления трехслойных сотовых конструкций параболической

формы из композиционных материалов// Композиционные материалы в промышленности (Славполик 2000).: Тез. докл.20-ой Межд. конф. - Киев, 2000. - С.9-10.

2. Опыт изготовления параболических зеркал-концентраторов солнечной энергии из композиционных материалов. А.И.Алямовский, Н.И. Копыл, Ю.В. Сумин и др. // Перспективные материалы. Тез. докл. Межд. конф. - Киев, 1999. - С.22.

3. Сумин Ю.В. Разработка и исследование технологии изготовления трех-слойных сотовых конструкций параболической формы из композиционных материалов // 15-ая НТК молодых ученых и специалистов РКК «Энергия» им. С.П. Королева: Тез. докл. - Королёв, 1999. - С.87-88.

4. Алямовский А.И., Копыл Н.И., Сумин Ю.В. Разработка и исследование конструкции параболического зеркала-концентратора солнечной энергии из композиционных материалов. // Перспективные материалы. Тез. докл. Межд. конф. - Киев, 1999. - С. 62-63.

Подписано в печать 24.II.2000 г. объем I.0 п.л. тир. 100 **Зак. 181**
Типография МГТУ им.Н.Э.Баумана.