

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ АНТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ АНТЕНН ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Балашов В.М., Дарьев Д.В.
ОАО «Холдинговая компания «Ленинец»*

*Семенова Е.Г.
Государственный университет аэрокосмического приборостроения*

Предложены методики и программные средства расчета физико-механических характеристик сложнопрофильных поверхностей антенных устройств, выполненных из полимерных композиционных волокнистых материалов. Представлены результаты исследования технологии производства антенных конструкций из полимерных композитов, подтвердившие возможность снижения деформаций сложнопрофильных поверхностей антенных конструкций за счет технически обоснованного выбора значений технологических режимов формования.

Объективные тенденции развития современных бортовых радиоэлектронных систем и комплексов специального назначения заключаются в том, что требования обеспечения допустимых искажения сложнопрофильных поверхностей элементов антенных устройств дополняются необходимостью снижения массы и габаритных размеров антенного устройства в целом. Закономерным следствием этого является использование высокопрочных материалов с малой плотностью, исключение или минимизация конструкционных элементов крепления, уменьшение толщины применяемых листовых или многослойных конструкций, постепенное замещение металлических изделий узлами и деталями, выполненными из полимерных материалов, обеспечивающих повышенную коррозионную стойкость, эксплуатационную стабильность и высокий коэффициент использования материала [1, 2].

Высокие требования к точности изготовления элементов антенных устройств и сохранению этой точности в процессе эксплуатации радиоэлектронных комплексов определяют необходимость разработки и применения перспективных конструкционных материалов, прогнозирования их физико-механических свойств в процессе эксплуатации изделия.

Сочетание требований высокой точности изготовления антенных конструкций, сохранения точности при эксплуатации радиоэлектронного комплекса и минимизация массы бортовой радиоаппаратуры предопределяют выбор полимерных композиционных материалов.

Разработка прецизионных армированных конструкций (например, антенных устройств, несущих конструкций, теплозащитных экранов и т.д.) бортовых комплексов должно проводиться с учетом наличия возмущающих факторов, имеющих различную физическую природу. Действительно, требования эксплуатационной стабильности армированных конструкций реализуются при климатических и механических воздействиях, характерных для бортовых комплексов и являющихся по отношению к ним внешними. При этом если парирование механических воздействий на армированные конструкции решается путем отработки дополнительных конструктивных элементов, обеспечивающих их жесткость, необходимые прочностные характеристики, сохранение профиля и взаимного расположения формообразующих поверхностей, то компенсация влияния климатических факторов, в первую очередь, связана с тщательной отработкой и обоснованным выбором используемых конструкционных материалов [2].

Наряду с внешними возмущениями армированные антенные конструкции испытывают и внутренние шумы, связанные с влиянием используемых схем армирования и технологическими погрешностями укладки монослоев при их реализации.

В разработанной методике определения упругих характеристик однонаправленных композиционных структур (КС) полимерного композиционного волокнистого материала (ПКВМ) многослойная среда представлена в виде пластины, составленной из чередующихся слоев, которые обладают свойствами волокон или матрицы.

С учетом особенностей изготовления армированных конструкций из ПКВМ изделие имеет слоистую, а не волокнистую структуру вследствие наличия прослоек полимерного связующего между слоями ровницы, а, следовательно, композиционная структура принципиально является ортотропной.

Обычно армированные конструкции антенных устройств являются тонкостенными и поэтому допустимо не учитывать напряжения, которые действуют в направлении осей, и рассматривать плосконапряженное состояние. Таким образом, задача расчета конструкции армированных антенных конструкций из ПКВМ сводится к плоской задаче теории упругости ортотропных или трансверсально-изотропных материалов. В общем случае упругие свойства ориентированных КС характеризуются с помощью 9 независимых упругих постоянных для ортотропного тела и 5 постоянных - для трансверсально-изотропных тел [2, 3].

Для информационной поддержки проектирования, производства и эксплуатации конструктивных элементов, выполненных из ПКВМ разработаны алгоритмы и программные модули моделирования, обеспечивающие выбор способов армирования, гарантирующих низкое коробление изделий при наличии ограничений на их физико-механические свойства.

При анализе влияния схем армирования (СА) на коробление изделий из ПКВМ исследованы однородные СА с прямолинейной укладкой как однопараметрические (перекрестные), так и многопараметрические: двухпараметрические и квазиизотропные [2].

Разработанное программное обеспечение предназначено для проектирования многослойных конструкций сложнопрофильных элементов из ПКВМ и обеспечивает решение плоской задачи теории упругости ортотропных или трансверсально-изотропных материалов [4, 5].

Программное обеспечение предназначено для расчета физико-механических характеристик и определения параметров деформированного состояния многослойных конструкций из композитных материалов по заданным свойствам компонент и схеме армирования. Компонентами композиционной структуры являются армирующее волокно (углеродное или стекловолокно) и связующее [5].

При создании программного продукта использована методика, в рамках которой основная задача разбивается на подзадачи (модули), реализуемые как автономные подпрограммы. В свою очередь, каждая подзадача так же может разбиваться на более мелкие модули. Программный модуль представляет собой реализацию одной или нескольких функций. Выделение функций в автономную подпрограмму целесообразно в том случае, если:

- существует определенная повторяемость вызова данных функций за один цикл выполнения основной программы;
- планируется использование данных функций при проектировании иного программного обеспечения.

Выделение набора функций в отдельные модули облегчает процесс обнаружения ошибки внутри программы; каждая подпрограмма тестируется как независимый программный продукт.

Использование пакета графического программирования LabVIEW 7.0 позволяет создавать эргономичный пользовательский интерфейс при проектировании отдельной подпрограммы, что облегчает процесс обнаружения ошибки в программном коде и делает программный код более наглядным и понятным. Формирование подпрограмм целесообразно использовать и для облегчения процесса диагностики программного обеспечения на этапе проектирования.

Разработанный программный продукт включает в себя семь модулей – подпрограмм (рис.1):

1. FMP – модуль расчета физико-механических характеристик монослоя;
2. PFMJ – модуль формирования матрицы мембранно-изгибных жесткостей, данный модуль включает в себя три подпрограммы:
 - MGM II – подпрограмма определение матрицы монослоя в заданной системе координат;
 - OKS II – модуль определение координат текущего слоя;
 - OMMJ II – подпрограмма определения матрицы мембранно-изгибных жесткостей и вектора приведенных нагрузок;
3. OAPX – подпрограмма обращения матрицы A заданной размерности [MxM] и перерасчета вектора координат;
4. RF – подпрограмма преобразования данных для формирования, печати и сохранения отчетов в формате *****.xls**.

Приведенные модули в процессе проектирования условно разделены на два вида: обобщенные модули (OAPX, RF) и специальные. К последним относятся подпрограммы, в которых функции объединены с учетом специфики главной задачи – исследования характеристик многослойных конструкций из композитных материалов.

Повторно использовать подпрограммы можно только при проектировании программного обеспечения той же проблемной ориентации. Так, модуль «FMP» используется в программном обеспечении для моделирования чувствительности многослойных конструкций к погрешностям выкладки монослоев.

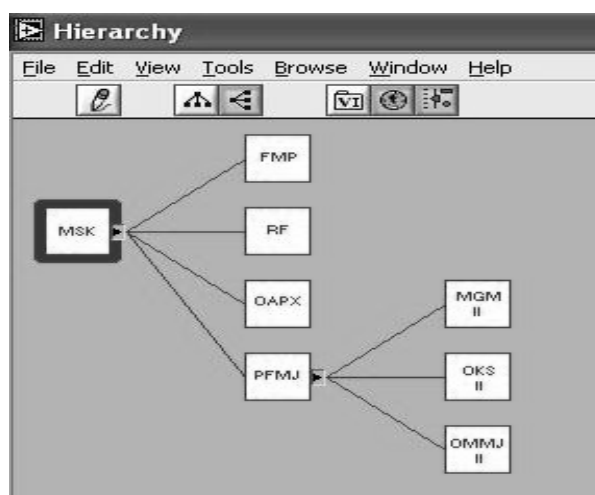


Рис.1 Пример модульного представления программы

К обобщенным модулям относятся подпрограммы, использование которых не зависит от специфики задачи, реализуемой основной программой. Разделение модулей на обобщенные и специальные позволило ввести градацию природы ошибок, отделить друг от друга ошибки методические, возникшие в результате формирования математического обеспечения (методик расчетов) и технические (программные), возникшие в результате проектирования программного обеспечения.

Для расширения возможностей статистического анализа и снижения вероятности ошибок, допущенных при эксплуатации, программа оснащена дополнительными опциями. Для проведения сравнительного анализа нескольких расчетов и для архивирования информации предусмотрена функция сохранения информации в формате *.xls. Это позволяет производить аналитические операции с использованием программного пакета MS Office Excel и языка программирования Visual Basic.

Программа оснащена дополнительными диагностическими функциями, позволяющими контролировать действия пользователя (рис.2).

Так, например, если пользователь изменил входной параметр, то подсвечивается название соответствующего раздела, и гаснет подсветка названий разделов, в которых выводится расчетная информация, это свидетельствует о том, что расчетная информация не соответствует исходным данным. В подразделе «таблица параметров», под основной таблицей, имеется строка состояния, в которой отображаются действия, выполняемые программой на текущий момент времени. Такие опции позволяют сократить пользовательские ошибки при расчетах.

Разработанный программный продукт обеспечивает наглядность процесса исследования физико-механических характеристик и определения параметров деформированного состояния многослойных конструкций из композитных материалов. Пользователю предоставлена возможность использования современных программных средств для проведения статистического анализа полученных результатов расчета.

Специфика разработанного пользовательского интерфейса исключает ошибки, допускаемые пользователем при интерпретации результатов расчетов.

Использование модульного принципа построения программного обеспечения позволило сократить как количество ошибок, допускаемых при проектировании, так и временные затраты на их диагностику и устранение. Разработанная методика позволяет использовать технологии параллельного программирования и ресурсы многопроцессорных систем.

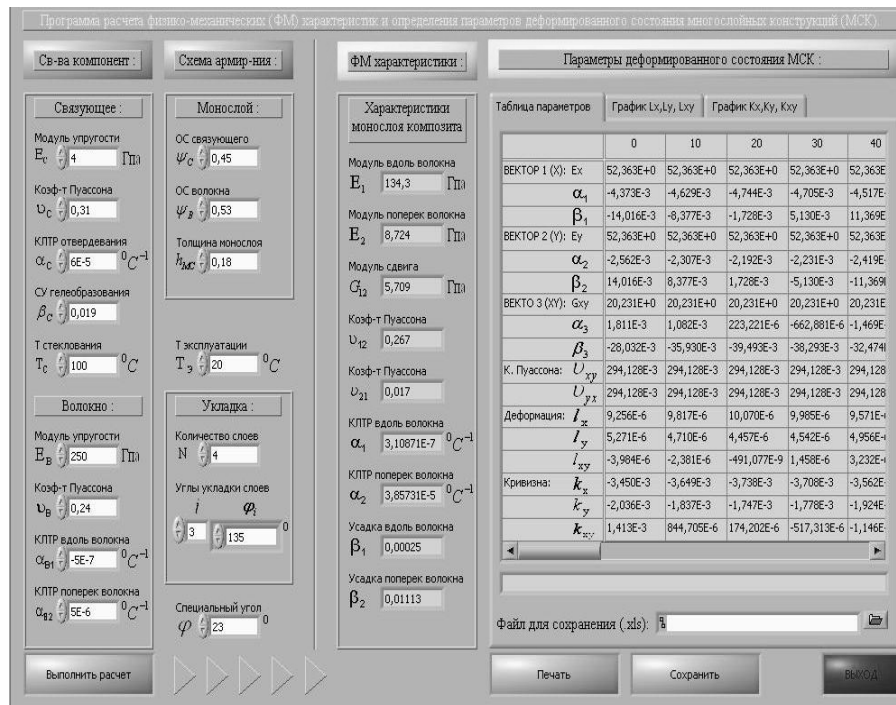


Рис.2 Внешний вид пользовательского интерфейса программы.

Предлагаемый программный продукт позволил оценить зависимость параметров деформированного состояния многослойных конструкций от физико-механических свойств и дилатометрических характеристик используемых материалов и схем армирования и обеспечил технически обоснованный выбор оптимального варианта при проектировании антенных конструкций. В качестве критерия оптимизации приняты коробление конструктивных элементов и радиус кривизны деформированной поверхности.

При анализе влияния схем армирования (СА) на коробление изделий из ПКВМ рассматривались однородные СА с прямолинейной укладкой как однопараметрические (перекрестные), так и многопараметрические: двухпараметрические и квазиизотропные. Двухпараметрическая схема армирования характеризуется двумя значениями углов укладки монослоев: α ($-\alpha$), φ ($-\varphi$). В квазиизотропной СА слои расположены под углами φ_i , вычисляемыми из соотношения

$$\varphi_i = (i - 1)180/N, \quad (1)$$

где N - количество слоев; i - номер слоя, $i = 1, 2, \dots, N$.

В качестве исходных данных для углекомполитов и их компонент приняты следующие значения входных параметров:

эпоксидное связующее: модуль упругости $E_c = 4$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_c = 0.31$, химическая (структурная) усадка после гелеобразования $\beta_c = 0.015$, температура стеклования $T_c = 110^\circ\text{C}$, КЛТР в стеклообразном состоянии $\alpha_c = 60 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} / 38/;$

углеволокно: модуль упругости $E_B = 250$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_B = 0.24$, КЛТР вдоль волокна $\alpha_{B1} = -0.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, КЛТР поперек волокна $\alpha_{B2} = 5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} / 52/;$

структурные параметры монослоя: объемное содержание волокна (коэффициент армирования) $\psi_B = 0.56$, объемное содержание связующего $\psi_c = 0.42$, объемное содержание пор $\psi_n = 0.02;$

толщина монослоя: $h_c = 1.7 \times 10^{-4}$ м.

Рассмотрены перекрестные схемы армирования (ПСА), как чередующиеся (углы укладки смежных слоев в пакете чередуются: $+\varphi, -\varphi, +\varphi, -\varphi, \dots$, так и нечередующиеся.

Теоретические зависимости изменения кривизны k от количества слоев и угла укладки φ для чередующихся ПСА представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

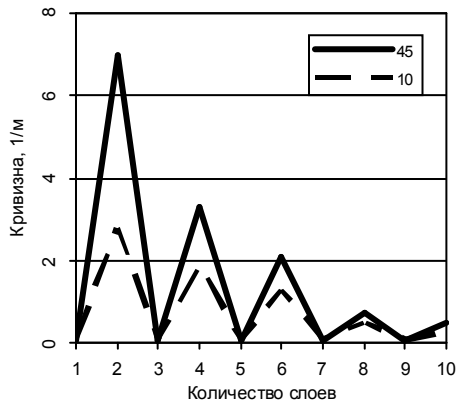


Рис. 3. Зависимость кривизны k от количества слоев для чередующихся ПСА

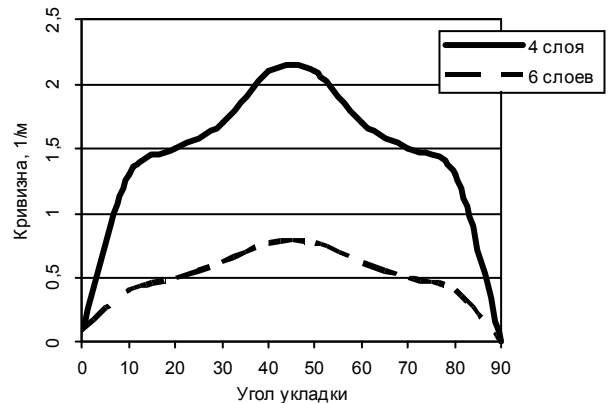


Рис. 4. Зависимость кривизны k от угла укладки для чередующихся ПСА

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

- нечетное количество слоев приводит к нулевому короблению;
- четное количество слоев приводит к короблению, величина которого убывает с ростом числа слоев, причем для малого числа слоев коробление зависит от угла укладки φ и достигает максимума при ортогональной, а для числа слоев, большего 8, остается постоянной на интервале значений φ от 15 до 75°;
- для $N > 4$ величина k настолько велика, что отклонения значительно превышают толщину формируемого пакета, что нарушает условия малых прогибов.

При использовании чередующихся ПСА минимальное коробление достигается при нечетном количестве слоев. В этом случае под углом $+\varphi$ и $-\varphi$ уложено различное количество слоев, т.е. структура материала становится несимметричной и неравновесной. При невозможности использования четного числа слоев возникают ограничения на толщину элементов антенных конструкций, что для тонкостенных изделий имеет важное значение.

Этот недостаток исключается в случае применения нечередующихся ПСА, для которых характерно наличие соседних одинаково ориентированных слоев, что приводит к сильной взаимосвязи между мембранными и изгибными деформациями []. Из нечередующихся ПСА следует выбирать схемы с минимальным количеством одинаково ориентированных соседних слоев и углами укладки

$$\varphi_i = (-1)^i \varphi, \quad (2)$$

где
$$l_i = \left\lceil \frac{2i-1}{N} \right\rceil + i, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Общее правило армирования САЗ с ПСА для минимального коробления при заданном количестве слоев имеет вид

$$\varphi_i = (-1)^i \varphi, \quad (3)$$

где
$$l_i = \left\lceil \frac{2i-1}{N} \left[\left(1 + 2 \left\lceil \frac{N}{2} \right\rceil - N \right) \right] \right\rceil + i, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

ПСА обладают высокой технологичностью и на их основе может быть обеспечена требуемая изотропность материала путем варьирования угла укладки слоев φ .

Однако ПСА не удовлетворяют требованиям минимальной массы при заданной системе нагрузок, что приводит к необходимости применять многопараметрические СА с меньшей технологичностью, например двухпараметрические схемы армирования (ДСА).

Исследования зависимости величины κ от углов ориентации слоев подтвердили, что поверхность отклика имеет многоэкстремальный характер и не является дифференцируемой на всем диапазоне варьирования параметров, что потребовало применения методов полного перебора вариантов ориентации слоев и очередности их укладки.

Кроме того, кривизны κ_x и κ_y для ДСА, в отличие от ПСА, могут иметь как одинаковые, так и разные абсолютные величины и знаки, поэтому для оценки коробления СЗА с ДСА принято максимальное отклонение от заданной формы на некоторой базе $l\delta$

$$\delta = \frac{1}{2} (|\kappa_x| + |\kappa_y|) \cdot l\delta^2. \quad (4)$$

Для анализа коробления антенных конструкций с ДСА моделировались структуры с количеством слоев от 3 до 9. Зависимости κ_x , κ_y , от углов укладки некоторых ДСА представлены на рис. 5.

Результаты моделирования СЗА подтвердили существование двух классов ДСА, обеспечивающих теоретически нулевое коробление:

- симметричные ДСА, в которых минимум коробления обеспечивается за счет попарной компенсации термоупругих моментов, создаваемых слоями, симметрично расположенными относительно срединной поверхности.
- несимметричные схемы, которые характеризуются интегральной (групповой) компенсацией термоупругих моментов отдельных монослоев.

Несимметричные ДСА с нулевым короблением крайне чувствительны к изменению угла укладки; практически нулевое коробление для этих схем армирования достигается при обеспечении точности углов укладки в пределах сотых долей градуса. Поэтому такие ДСА не могут быть рекомендованы для практического использования.

По результатам теоретических исследований коробления СЗА с ДСА можно сделать вывод о том, что для достижения минимального коробления изделий следует применять лишь симметричные ДСА.

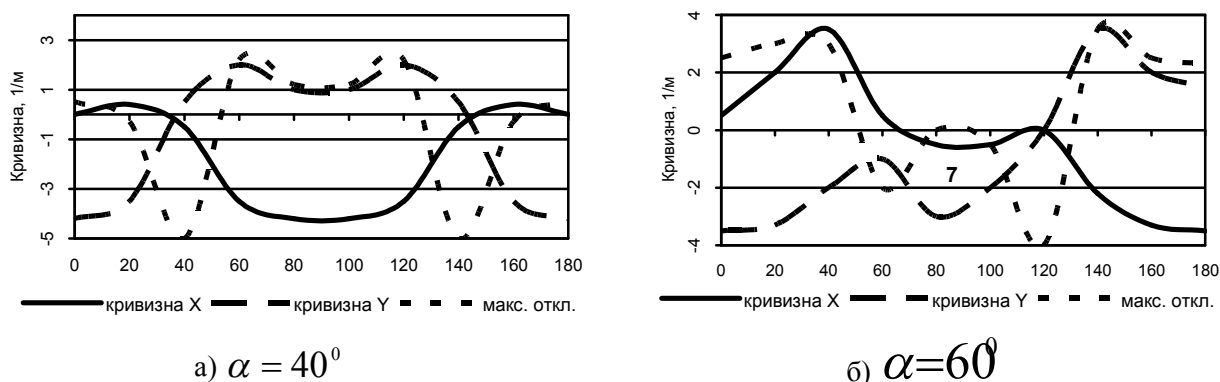


Рис. 5. Зависимость кривизн κ_x , κ_y и δ_{\max} от угла укладки для двухпараметрической схемы армирования $\alpha, -\alpha, \beta, -\beta, \alpha, -\alpha, \beta, -\beta$.

Рассмотренные перекрестные и двухпараметрические схемы армирования не удовлетворяют, в общем случае, требованию изотропии свойств в плоскости изделия. Указанные свойством обладают лишь квазиизотропные схемы армирования (КСА).

Анализ вариантов КСА выполнен для того же количества слоев, что и для ДСА. Число вариантов квазиизотропной укладки N слоев составляет $n_{кса} = \frac{1}{2}(N - 1)!$.

Коробление изделий с КСА сильно зависит от порядка укладки слоев. Результаты расчетов коробления для четырехслойных КСА приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кривизны для четырехслойной КСА при различной очередности укладки

Углы укладки слоев, град	Кривизны χ в системах координат, 1/м				Угол приведения θ , град
	K_x	K_y	K_{xy}	Макс. отклонение	
0, 45, 90, 135	-18.5	18.5	-37.2	52.4	22, 50
0, 45, 90, 135	-8.5	8.9	-18.1	25.2	22, 50
0, 45, 90, 135	-12.5	12.5	-12.5	44.6	17.62

По результатам моделирования КСА установлено, что среди квазиизотропных схем армирования существует класс схем с очень малым короблением, причем такие СА найдены для количества слоев $N \geq 6$ (табл. 2). Теоретически нулевое коробление обеспечивают схемы армирования, образованные симметричным сочетанием простых КСА (например, шестислойная схема с углами укладки: 0, 60, 120, 120, 60, 0).

Таблица 2

Квазиизотропные СА, обеспечивающие минимальное коробление

Углы укладки слоев, град	Приведенные кривизны χ , 1/м		Макс. отклонение, δ
	K_x	K_y	
6 слоев			
0, 90, 120, 30, 60, 150	0.00	0.00	0
0, 120, 60, 90, 30, 150	0.00	0.00	0
7 слоев			
0.0, 102.9, 77.1, 154.3, 51.4, 25.7, 128.6,	-4.30	4.30	108
0.0, 128.6, 51.4, 77.1, 102.9, 25.7, 154.3	-16.89	16.89	422
8 слоев			
0, 135, 67.5, 45, 112.5, 90, 22.5, 157.5,	-6.39	6.39	160
0, 112.5, 67.5, 22.5, 135, 90, 45, 157.5,	-7.28	7.28	182
0, 90, 135, 67.5, 45, 157.5, 22.5, 112.5,	-8.96	8.96	224
0, 90, 67.5, 135, 157.5, 45, 22.5, 112.5	-9.65	9.65	241

δ – максимальное отклонение на базе 100 мм, мкм.

Таким образом, найдены ПСА, ДСА и КСА, обеспечивающие минимальное коробление тонкостенных антенных конструкций, выполненных из ПКВМ.

Для оценки устойчивости схем армирования к погрешностям выкладки монослоев разработана программа моделирования чувствительности многослойных конструкций, использующая методику расчета коробления и метод статистического моделирования для расчета коробления пластины из полимерного композита, слои в котором уложены с малыми отклонениям от номинальных углов, причем угол укладки каждого слоя считается независимой нормально распределенной случайной величиной. Результатами работы программы являются гистограммы выборочной функции распределения кривизна пластины и максимального отклонения формы для ряда значений дисперсии углов укладки слоев и зависимости

вероятности обеспечения заданной степени точности для различных значений СКО углов укладки монослоев (рис.6).

Анализ устойчивости схем армирования антенных конструкций показал, что [2]:

- перекрестные СА обеспечивают удовлетворительную точность в случае, если угол укладки $\varphi < 10^\circ$, а погрешность укладки не превышает 1° ;
- симметричные двухпараметрические СА реагируют на технологические погрешности укладки в зависимости от ее очередности; приемлемая точность может быть получена лишь в случаях, когда погрешность укладки не превышает $1,5^\circ$;
- симметричные квазиизотропные СА более устойчивы к погрешностям укладки, обеспечивают точность изделий, даже если погрешность укладки достигает $2,5^\circ$.

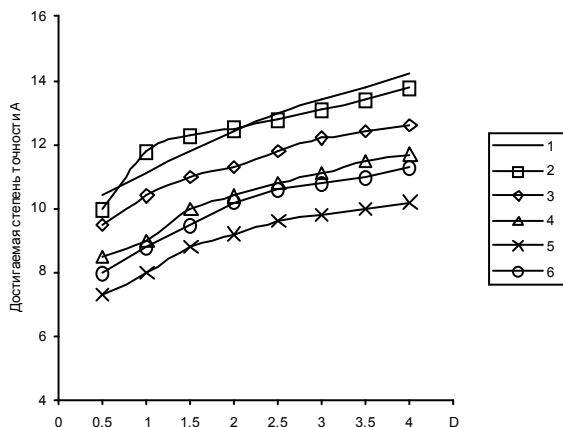


Рис.6. Зависимость достигаемой степени точности A от величины допуска D на угол укладки при заданном уровне доверительной вероятности P ($P=95\%$) для различных схем армирования:

1. – 45, 0, -45, -45, 0, 45;
2. – 0, 30, -30, 0, -30, 30, 0;
3. – 30, -30, 60, -60, -60, 60, -30, 30;
4. – 0, -30, 30, 45, 90, 45, 30, -30, 0;
5. – 0, 45, -45, 90, 0, 90, -45, 45, 0;
6. – 0, -60, 60, 45, 90, 45, 60, -60, 0.

Для управления характеристиками изделий, в том числе и точностными, необходимы модели, отражающие зависимость этих характеристик от технологических факторов (температуры, давления, времени выдержки, скорости нагрева и охлаждения и др.). Однако сложность протекающих при формировании физико-химических процессов не позволяет достаточно точно описать влияние технологических факторов на основные характеристики ПКВМ и качество изделий из них с помощью строгих математических моделей [2, 6].

Таким образом, проблема управления физико-химическими процессами формования и оптимизации технологических режимов представляет собой достаточно сложную задачу. Дисперсионный анализ не дает ответа на вопрос об оптимальном сочетании факторов, поэтому приходится применять более сложные методы исследования поверхности отклика (многофакторный регрессионный анализ и др.).

Анализ известных экспериментальных данных показывает, что в окрестности оптимальной точки зависимость свойств ПКВМ от технологических параметров может быть описана полиномом невысокой степени. Поэтому широкое распространение получили исследования на основе многофакторного эксперимента [7, 8]. Однако, часто расположение оптимальной области априорно неизвестно, что требует резкого увеличения числа экспериментов. Зависимость основных свойств ПКВМ от режимов формования имеет «платообразный» характер и в окрестности оптимальной точки отклонения режимов не приводят к заметному ухудшению ПКВМ [2, 4].

С другой стороны, работа в области максимальных градиентов параметра оптимизации приводит к его значительному изменению даже при несущественных изменениях технологических факторов. Учитывая указанное обстоятельство, имеет смысл говорить о необходимости разработки системы допусков на отклонения технологических параметров при формировании, обеспечивающей заданное качество изделий [2]. Такая система допусков может быть построена на основе анализа регрессионных уравнений при условии предварительной проверки адекватности модели и статистической значимости ее коэффициентов.

Одним из наиболее ответственных этапов планирования эксперимента является построение модели, адекватной исследуемому процессу. Зависимость оптимизируемых

параметров от входных факторов будем строить в виде полиномиальных регрессионных моделей, хорошо зарекомендовавших себя в практике планирования [7]. Результаты анализа литературных источников позволяют сделать вывод об экстремальном характере искомых зависимостей, поэтому полиномиальные модели должны включать квадратичные эффекты.

Выбор диапазонов варьирования факторов выполнен с учетом выполнения двух основных условий. Во-первых, механизм действия каждого фактора во всем диапазоне должен быть качественно одинаковым. Во-вторых, уровни факторов должны быть статистически различимы с учетом погрешности их задания и регистрации. Так, согласно первому условию, не рекомендуется выбирать давление формования более 1 МПа, т. к. это может сопровождаться разрушением волокон, а температура отверждения должна быть меньше температуры деструкции полимерной матрицы.

За центры варьирования примем такие значения параметров, которые наиболее близки к стандартным технологическим режимам отверждения исследуемых связующих. В этом случае единый план эксперимента позволяет не только значительно упростить обработку результатов, но и проводить их сравнительный анализ [8].

В табл.3 сведены крайние и средний уровни варьирования факторов.

Таблица 3

Уровни варьирования параметров технологического процесса формования

Уровни	Температура				Давление			
	T ₁ , °C	t _{r1} , мин	T ₂ , °C	t _{r2} , мин	t _{p0} , мин	P ₁ , МПа	t _{p1} , мин	P ₂ , МПа
+1	T _{1,н} +30	t _{r1,н} + 25	T _{2,н} + 20	t _{r2,н} + 40	t _{p0,н} + 20	P _{1,н} + 0,2	t _{p1,н} + 20	P _{2,н} + 0,4
0	T _{1,н}	t _{r1,н}	T _{2,н}	t _{r2,н}	t _{p0,н}	P _{1,н}	t _{p1,н}	P _{2,н}
-1	T _{1,н} -30	t _{r1,н} - 25	T _{2,н} - 20	t _{r2,н} - 40	t _{p0,н} - 20	P _{1,н} - 0,2	t _{p1,н} - 20	P _{2,н} - 0,4

На основании анализа литературных источников и результатов предварительных экспериментов была построена априорная модель следующего вида:

$$\begin{aligned}
 Y = & A_0 + A_1X_1 + A_3X_3 + A_4X_4 + A_5X_5 + A_6X_6 + A_7X_7 + A_8X_8 + A_9X_1X_2 + \\
 & + A_{10}X_1X_5 + A_{11}X_1X_6 + A_{12}X_3X_4 + A_{13}X_3X_6 + A_{14}X_6X_7 + A_{15}X_1X_2X_3 + \\
 & + A_{16}X_1X_2X_4 + A_{17}X_1X_2X_5 + A_{18}X_1X_2X_8 + A_{19}X_3X_4X_5 + A_{20}X_3X_4X_8 + \\
 & + A_{21}X_3X_5X_8 + A_{22}X_3X_6X_7 + A_{23}X_4X_6X_7 + A_{24}X_5X_6X_7 + A_{25}X_6X_7X_8 + \\
 & + A_{26}X_1X_2X_6X_7 + A_{27}X_1^2 + A_{28}X_3^2X_4 + A_{29}X_4^2X_3 + A_{30}X_5^2X_1 + A_{31}X_6^2X_7
 \end{aligned}$$

Данная модель учитывает практически все возможные взаимодействия, потенциально влияющие на выходные величины, а также влияние входных факторов на оптимизируемые параметры, что является необходимым условием применения единого плана эксперимента.

Для выбора оптимальных генерируемых соотношений использована методика направленного перебора определяющих соотношений с выбором главного определяющего контраста [7, 8].

В данной работе исследовались два типа эпоксидных связующих, которые нашли широкое применение для изготовления препрегов: связующие ЭНФБ (ТУ1-596-36-82) и ЭДТ-69Н (М) (ТУ 1-595-12-672-2002). Разработчиками связующих рекомендованы следующие режимы отверждения:

- ЭНФБ
- подача давления до 0.6 МПа;
 - нагрев от 20°C до 160°C в течение одного часа;
 - отверждение при температуре 160°C в течение 6 часов;
 - охлаждение от 160°C до 20°C в течение 2 часов.

ЭДТ-69Н(М) - нагрев от 20°C до 120°C в течение 0,5 часа;

- выдержка 0.2 часа и подача давления до 0.5 МПа;
- выдержка 0.2 часа и нагрев до 150°C;
- отверждение при 150°C в течение 3 часов;
- охлаждение от 150°C до 40°C в течение 2 часов;

Для изготовления образцов использовано технологическое оснащение с внутренним подогревом. Примеры температурных профилей нижнего и верхнего подогревателя, а также временной зависимости вакуумирования представлены на рис. 7-9.

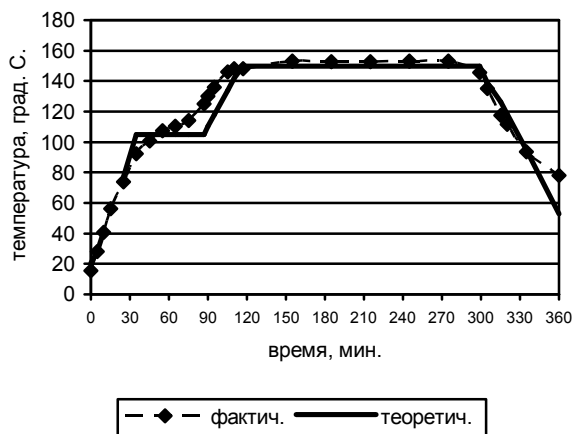


Рис. 7. Температура нижнего нагревателя технологического оснащения

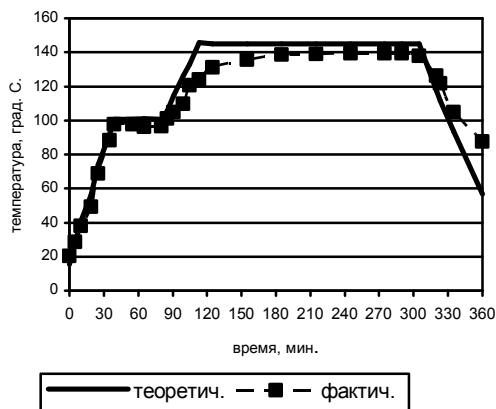


Рис. 8. Температура верхнего нагревателя технологического оснащения

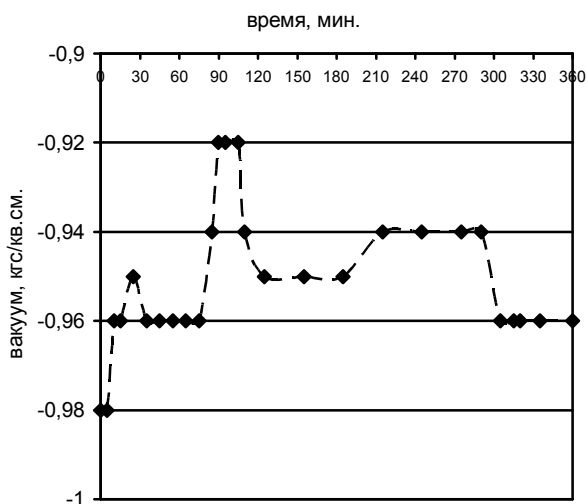


Рис. 9. Временная зависимость давления при вакуумном формовании образцов

Значение отклика получено как среднее арифметическое из трех параллельных опытов, проводимых в каждой точке плана. Максимальный коэффициент вариации во всех экспериментах не превышал 7%.

Для решения поставленной задачи построения регрессионных моделей для каждого выходного параметра потребовалась аппроксимация полученных точек отклика некоторым полиномом, включающим квадратичные слагаемые.

Для реализации указанной процедуры и исследования получаемых моделей разработана и программно реализована методика, позволяющая генерировать матрицы планирования, аппроксимировать экспериментальные результаты полиномом любого порядка, отображать полученные модели в графической форме, а также выполнять ряд других операций, в частности, проверку значимости коэффициентов и адекватности модели.

Исследование зависимостей каждого оптимизирующего параметра от входных факторов проводилось с помощью построения групп плоских срезов девятимерной поверхности отклика, причем каждый срез группы соответствовал фиксированному значению одного из семи оставшихся факторов.

Для нахождения оптимальных технологических режимов формования применялись процедуры поиска глобальных и условных экстремумов функции нескольких переменных, которые используют методы адаптивного случайного поиска [8]. Из анализа результатов экспериментальных исследований и полученных регрессионных моделей можно сделать следующие выводы [2, 3]

Коэффициент армирования ПКВМ зависит не только от технологических режимов, но и от количества слоев препрега в заготовке. Давление формования оказывает значительное влияние на ψ_v только в диапазоне 0.1...0.6 МПа, причем в толстостенных конструкциях (более 10 слоев) он остается достаточно стабильным при изменении T_1 от 80 до 120°C.

Различные прочностные показатели материала по-разному реагируют на изменение технологических режимов. Наиболее чувствительными характеристиками являются прочность на межслоевой сдвиг и ударная вязкость. Наоборот, прочность на растяжение является относительно стабильной величиной. Так, например, увеличение давления формования от 0.1 до 0.6 МПа ведет к монотонному возрастанию σ_p на 10-15%. Увеличение времени и температуры отверждения благоприятно сказывается на прочности материала только в том случае, если первая ступень формования проводилась при сравнительно низкой температуре. При уменьшении P_2 на 20%, а t_{r2} на 30% по сравнению с оптимальными прочность σ_p углекомпозиата уменьшится всего на 7-10%.

Плотность полимерного композита монотонно снижается по мере увеличения продолжительности первой температурной ступени и монотонно возрастает с увеличением продолжительности второй температурной ступени.

Максимальное давление 1 МПа не приводит к разрушению волокон при формовании и может быть рекомендовано к применению в реальных технологических процессах.

В качестве экспериментально проверяемых схем армирования сложнопрофильных элементов бортовых комплексов на зависимость точности соблюдения заданной формы от технологических режимов формования были выбраны две схемы: (0, 90)×4 и (0, 90, +45, -45)×2. Выбор был обусловлен тремя причинами:

- указанные схемы армирования являются наиболее распространенными при изготовлении изделий из однонаправленных армированных композитов;
- данные схемы приводят к теоретически ненулевому короблению и, следовательно, являются весьма устойчивыми к погрешностям укладки, неизбежно возникающим при изготовлении изделий из полимерного композита;
- оптимальные технологические режимы формования, найденные для одних схем армирования, очевидно, являются оптимальными и для остальных СА, т. к. причины коробления имеют одинаковую природу.

Анализ экспериментальных данных и регрессионных зависимостей величины коробления от технологических режимов формования показывает, что они носят экстремальный характер. Оптимизация режимов формования дает возможность уменьшить величину коробления на 30...35% [2, 6].

В таблице 4 приведены оптимальные режимы формования углекомпозиата на основе связующих ЭНФБ и ЭДТ-69Н(М) по отдельным физико-механическим характеристикам, полученным с помощью регрессионных зависимостей.

Таблица 4

Оптимальные режимы формования углекомпозиата по отдельным физико-механическим характеристикам

Режимы формования	Ψ_B	σ_p	σ_{II}	τ_c	E	α	χ	a
	связующее ЭНФБ							
T ₁ , °C	90	70	70	70	90	90	70	80
t _{T1} , мин	50	60	60	40	50	50	60	40
T ₂ , °C	170	170	160	150	170	170	140	130
t _{T2} , мин	200	300	300	180	200	160	160	140
t _{p0} , мин	20	30	30	40	20	30	50	50
P ₁ , МПа	0.5	0.2	0.3	0.3	0.5	0.5	0.2	0.1
t _{p1} , мин	20	30	40	50	30	40	60	60
P ₂ , МПа	1.0	1.0	0.8	0.5	1.0	1.0	0.6	0.4
связующее ЭДТ-69Н(М)								
T ₁ , °C	110	100	100	90	110	110	90	100
t _{T1} , мин	35	30	25	25	30	30	25	25
T ₂ , °C	140	140	140	130	140	140	130	130
t _{T2} , мин	160	200	200	200	180	180	180	160
t _{p0} , мин	20	30	30	40	20	30	50	50
P ₁ , МПа	0.5	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2
t _{p1} , мин	20	30	30	40	30	40	70	70
P ₂ , МПа	1.0	1.0	0.8	0.6	1.0	1.0	0.7	0.5

Сравнение характеристик материалов, получаемых при формовании изделий методами вакуумного и пресскамерного формования, представлено в таблице 5.

Для получения оптимального сочетания свойств углекомпозиата необходимо учитывать, что поверхность отклика практически всех характеристик материала имеет платообразный характер. Вследствие этого имеет смысл говорить не столько об оптимальных режимах формования, сколько о системе допусков на отклонения технологических режимов, которая обеспечивает сохранение характеристик ПКВМ на уровне не менее 90% от оптимальных [2, 6]. Для углекомпозиата такая система допусков приведена в таблице 6 [2].

Таблица 5

Сравнение методов и режимов формования

Характеристика	Метод вакуумного формования		Пресскамерный метод			
			Рекомендуемые		Оптимальные	
	средн.	СКО	средн.	СКО	средн.	СКО
связующее ЭНФБ						
σ_p , МПа	234.1	18.7	256.3	15.6	288.2	13.9
σ_{II} , МПа	388.2	25.9	419.6	24.1	487.5	15.4
τ_c , МПа	49.7	10.3	54.8	8.4	67.7	3.2
E ₁ , МПа	119.8	13.5	132.7	10.2	143.4	7.1
E ₂ , МПа	9.5	1.2	10.8	1.0	11.6	0.6
$\alpha_1 \cdot 10^7$, 1/°C	6.5	0.6	6.0	0.4	5.5	0.3
$\alpha_2 \cdot 10^7$, 1/°C	42.2	3.3	38.4	2.1	33.2	1.6
α , Дж/см ²	4.6	1.0	6.7	0.8	8.5	0.5
χ , 1/м	1.42	0.15	1.23	0.09	1.05	0.03
связующее ЭДТ-69Н(М)						

σ_p , МПа	254.4	16.1	281.3	13.8	311.5	12.4
$\sigma_{и}$, МПа	397.2	19.8	441.7	16.2	519.7	15.4
τ_c , МПа	43.5	7.0	55.6	4.5	72.4	3.6
E_1 , МПа	128.7	9.6	139.4	8.9	149.9	7.6
E_2 , МПа	8.8	1.1	10.9	0.9	12.8	0.7
$\alpha_1 \cdot 10^7$, 1/°C	9.3	0.9	8.6	0.6	7.8	0.4
$\alpha_2 \cdot 10^7$, 1/°C	45.4	3.2	41.2	2.5	36.7	2.1
α , Дж/см ²	8.1	1.1	10.3	0.8	13.2	0.6
χ , 1/м	1.22	0.13	0.98	0.09	0.73	0.04

Таблица 6

Система допусков на отклонения технологических режимов формования углекомпозиата, обеспечивающих сохранение оптимальных свойств на уровне 90%

Режимы формования	ψ_v	E	σ_p	τ_c	α	χ
	связующее ЭНФБ					
T_1 , °C	80...100	60...90	60...80	65...75	80...100	60...75
t_{r1} , мин	45...60	50...80	50...70	35...50	40...60	50...65
T_2 , °C	160...190	160...200	155...170	145...155	160...180	145...160
t_{r2} , мин	180...300	260...360	280...340	170...210	180...280	150...180
t_{p0} , мин	10...25	10...40	20...40	35...45	10...25	35...50
P_1 , МПа	0.3...0.5	0.1...0.4	0.2...0.4	0.2...0.4	0.4...0.5	0.1...0.3
t_{p1} , мин	10...30	15...40	30...45	45...55	10...35	45...65
P_2 , МПа	0.8...1.0	0.8...1.0	0.7...0.9	0.4...0.6	0.8...1.0	0.5...0.7
связующее ЭДТ-69Н(М)						
T_1 , °C	100...120	90-130	90...110	85...95	90...120	80...95
t_{r1} , мин	30...40	25...35	25...35	20...30	25...35	20...30
T_2 , °C	120...160	120...160	120...160	110...150	120...160	110...150
t_{r2} , мин	140...180	160...200	190...210	190...210	160...200	160...200
t_{p0} , мин	10...25	10...40	20...40	35...45	10...25	40...50
P_1 , МПа	0.4...0.6	0.4...0.6	0.3...0.45	0.3...0.5	0.4...0.5	0.3...0.45
t_{p1} , мин	10...30	20...40	20...35	35...45	10...40	50...75
P_2 , МПа	0.8...1.0	0.8...1.0	0.7...0.9	0.5...0.7	0.8...1.0	0.6...0.8

Разработанная параметрическая модель технологического процесса формования сложнопрофильных элементов антенных конструкций позволила исследовать свойства как материала, так и элемента конструкции, представила возможность оптимизации (по выбранному критерию) параметров технологического процесса и формирования систему допусков на отклонения режимов формования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов В. Исследование в США перспективных направлений развития авиационно-космической техники. // Зарубежное военное обозрение. 1990. вып. 6, с. 31-38
2. Семенова Е.Г. Основы моделирования и диагностики антенных устройств бортовых комплексов. – СПб: Политехника, 2003. – 186с
3. Балашов В.М., Семенова Е.Г., Трефилов Н.А. Технология производства антенн и устройств СВЧ. М.: Изд-во МПИ «Мир книги», 1992. – 180с.
4. Балашов В.М., Семенова Е.Г., Шингарев Р.Р. Оптимизация конструкций зеркальных антенн из полимерных композитов. – Вопросы радиоэлектроники, сер. РЛТ, 2007, вып. 3, с. 139-146
5. Балашов В.М., Семенова Е.Г.. Информационная поддержка проектирования, производства и эксплуатации конструктивных элементов, выполненных из полимерных

композитов. «Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах». Труды Международной научно-технической конференции, Сочи, 2007. с. 77-84.

6. Шмергельский Г.С. Технологические пути улучшения структуры и прочностных характеристик деталей из стекло- и углепластиков, изготавливаемых прессованием // Механика композитных материалов. 1987, вып. 4. С. 713-718.
7. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ. / Дж. Он Ким, Ч.Ю. Мьюллер и др. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
8. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Пер. с нем. – М.: Мир, 1977. – 552с