



На правах рукописи

Пье Пху Маунг

**МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ТОНКОСТЕННЫХ РЕФЛЕКТОРОВ АНТЕНН ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель Малышева Галина Владленовна - доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты: Комаров Валерий Андреевич - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструкция и проектирование летательных аппаратов» Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский технический университет имени академика С.П. Королева».

Новиков Валерий Александрович - кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Академия стандартизации, метрологии и сертификации (учебная)»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ».

Защита состоится «21» декабря 2017 г. в _____ часов на заседании Диссертационного совета Д 212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=84936.

Автореферат разослан « _____ » октября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.125.10
кандидат технических наук, доцент

Денискина А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В качестве конструкционного материала при изготовлении рефлекторов антенн летательных аппаратов (ЛА) широкое распространение получили углепластики, что связано с комплексом их уникальных свойств, обеспечивающих выполнение требований по термостабильности, сравнительно малой плотности при одновременно высокой жесткости и прочности. Однако, себестоимость изделий из углепластиков выше, чем при использовании других конструкционных материалов, что во многом связано с длительностью процесса формования и высокой стоимостью применяемых препрегов. Снижение себестоимости может быть обеспечено путем применения прямых методов формования, где вместо препрегов используются ткани. При технологии инфузионной пропитки под вакуумом – VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion), процесс нанесения связующего на ткань совмещен с операцией выкладки, что позволяет существенно снизить себестоимость изготовления, однако пористость таких деталей выше, что приводит к снижению их механических характеристик. Поэтому в настоящее время проводятся многочисленные исследования, связанные с оптимизацией технологических режимов формования и повышением качества.

В процессе отверждения эпоксидных связующих, которые являются наиболее распространенными олигомерными системами, используемыми при производстве изделий из углепластиков, имеет место выделение тепла. Количество выделяемого тепла зависит от химического состава связующего, скорости нагрева, теплофизических характеристик используемой ткани и т.д. Этот дополнительный тепловой поток может привести к перегреву, что будет способствовать появлению термических напряжений и, как следствие, снижению прочности формируемых изделий. Учет выделяемого теплового потока при разработке режимов отверждения позволил бы не только снизить его отрицательное воздействие, но и привел бы к некоторому уменьшению продолжительности процесса отверждения, что также будет оказывать положительное влияние на снижение себестоимости.

Для тонкостенных конструкций ЛА, к которым относятся рефлекторы антенн из полимерных композиционных материалов (ПКМ), влияние операций выкладки и отверждения на точность геометрических характеристик формируемой детали будет существенно выше, чем для более массивных деталей.

Таким образом, работа, ориентированная на совершенствование технологии производства тонкостенных рефлекторов антенн ЛА из ПКМ с улучшенным комплексом свойств, является актуальной и сопряжена с решением сложной научно-технической задачи, обладающей практической значимостью.

Целью работы является повышение функционального качества тонкостенных рефлекторов антенн летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов за счет совершенствования технологических процессов.

Задачи исследования:

1. Исследование кинетики процесса пропитывания тканей в зависимости от изменения сетевого угла при их выкладке на поверхность оснастки двойной кривизны.

2. Исследование особенности выкладки тканей на поверхность оснастки двойной кривизны в зависимости от их пористости.

3. Моделирование кинетики процесса отверждения полимерных композиционных материалов с учетом тепловых эффектов.

4. Оценка эффективности разработанной технологии.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

Разработана методика обеспечения процесса отверждения связующего, отличающаяся учетом экзотермических эффектов и позволяющая сократить продолжительность изготовления изделий из полимерных композиционных материалов.

Разработана методология оценки формообразующих свойств тканей при их выкладке на поверхность оснастки двойной кривизны, включающая:

- методику определения сетевых углов в зависимости от структуры тканного наполнителя;

- методику определения коэффициента проницаемости для конкретных пар «связующее-тканый наполнитель»;

- методику определения коэффициента пропитывания для конкретных пар «связующее-тканый наполнитель».

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математических моделей, позволяющих моделировать и оценивать:

- изменение формообразующих свойств тканей при их выкладке на поверхность оснастки двойной кривизны;

- кинетику процессов отверждения рефлекторов антенн из полимерных композиционных материалов с учетом тепловых эффектов.

Практическая значимость работы состоит в том, что ее результаты позволяют оптимизировать технологические режимы формования изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумной инфузии на операциях выкладки и отверждения. Учитываются формообразующие свойства тканей при выкройке и значения сетевых углов при пропитывании, позволяют определять место установки канала для подачи связующего.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика исследования кинетики процесса отверждения с учетом тепловыделения.
2. Методика определения сетевых углов в зависимости от структуры тканного наполнителя.
3. Методика определения коэффициента проницаемости и пропитывания для конкретных пар «связующее-тканый наполнитель».
4. Технология изготовления методом вакуумной инфузии рефлектора антенны летательных аппаратов с контролем качества.

Методология и методы исследования

Предлагаемые методы и подходы базируются на результатах моделирования кинетики процессов пропитывания и отверждения. Экспериментально кинетика процессов отверждения оценивалась на дифференциально-сканирующем калориметре ДСК DSC 204 F1 Phoenix® NETZSCH. Для отверждения образцов использовалась лабораторная электрическая печь серии XU, для отверждения рефлектора – Industrialoven 16100 L. Реологические свойства эпоксидных связующих оценивались на вискозиметре «Brookfield CAP 2000+» при различных скоростях сдвига. Структурный анализ изготовленных рефлекторов проводился на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172. Механические испытания образцов углепластиков на растяжение и межслоевой сдвиг проводили на универсальной машине Zwick/RoellZ100 TEW, прочность при ударе определяли на маятниковом копре PH 450. Для оценки точности изготовления профиля поверхности рефлектора использована бесконтактная мобильная измерительная система на базе лазерного радара серии MV200. Для математического моделирования использовались программы Femap NX Nastran, PAM RTM и WiseTex.

Достоверность научных положений и выводов, приведенных в диссертационной работе, подтверждается согласованием результатов математического моделирования с экспериментальными исследованиями и производством тонкостенных рефлекторов антенн из полимерных композиционных материалов с улучшенными прочностными свойствами.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались на международных и всероссийских научных конференциях и семинарах: 7th International Conference on «Advanced Materials Research (ICAMR 2017)», China, Hong Kong, 20-22 January 2017 г.; Международной конференции «Трансфер авиационно-космических технологий в ключевые секторы экономики» в рамках Чемпионата мира по композитам, Республика Татарстан, г. Казань, 29 октября 2016 г.; 2-ой

Международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» ИМАШ РАН, Россия, г. Москва, 18-20 октября 2016 г.; 12-м Международном научном симпозиуме «Передовые технические системы и технологии», Россия, г. Севастополь, 10-17 сентября 2016 г.; XIII Конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Россия, г. Москва, 13-15 апреля 2016 г.; XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», МАИ, Россия, г. Москва, 12-15 апреля 2016 г.; XL Академических чтениях по космонавтике, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, 26-29 января 2016 г.; 4th International Conference «Advanced Composite Materials and Technologies for Arduous Applications», United Kingdom, Wrexham, 5-6 November 2015 г.; Молодежной конференции «Фундаментальные научные основы современных комплексных методов исследований и испытаний материалов, а также элементов конструкций», ВИАМ, Россия, г. Москва, 30 ноября 2015 г.; X Молодежной научно-инженерной выставке «Политехника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, 7-10 октября 2015 г., награда I степени в номинации «Технология обработки материалов»; VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, 23-26 сентября 2015 г.; 11-м Международном научном симпозиуме «Передовые технические системы и технологии», Россия, г. Севастополь, 11-20 сентября 2015 г.; Студенческой весне, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, 20-23 апреля 2015 г.; Конкурсе «Инновационные технологии материалов и изделий текстильной и лёгкой промышленности» МГУДТ, Россия, г. Москва, 11 – 12 ноября 2014 г.

Публикации

Материалы диссертации отражены в 14 научных статьях, в том числе в 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для кандидатских диссертаций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы из 153 наименований. Текст изложен на 135 страницах, включает 95 рисунков и 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе проведен анализ современного состояния научной и технической информации по теме работы, выявлены проблемы, требующие дальнейшего изучения.

Рассматриваются современные конструкции рефлекторов антенн ЛА из ПКМ. Проведен выбор схемы конструкции рефлектора антенны (рис. 1). Данный рефлектор антенны имеет форму параболоида с двойной поверхностью, диаметром основания 1200 мм, фокусным расстоянием 500 мм и толщиной оболочки 0,6 мм. В данной работе выбран вариант конструкции рефлектора антенны с ребрением «шестиконечная звезда» с высотой ребер 90 мм, толщиной ребер 0,6 мм.

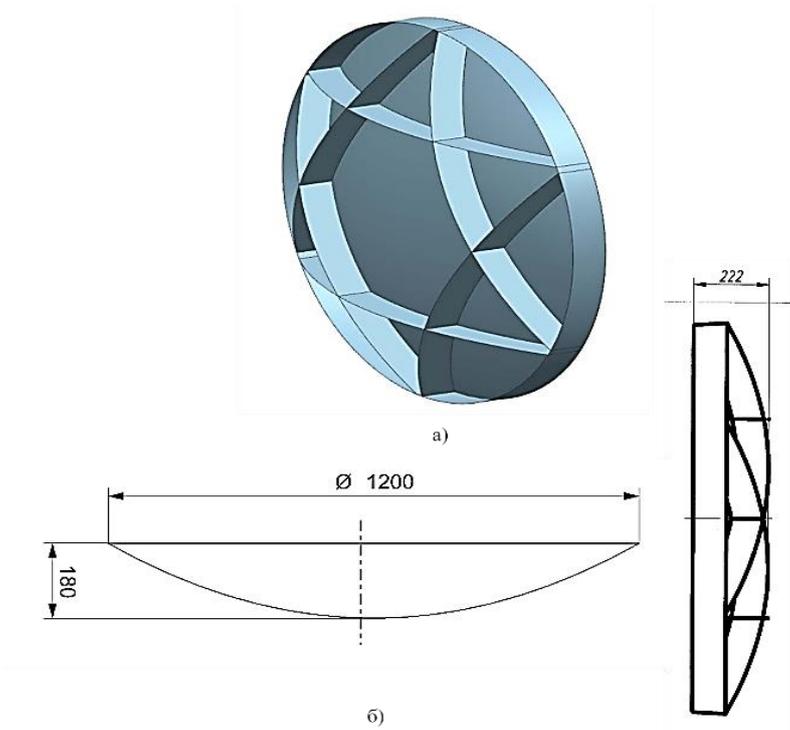


Рисунок 1 – Схема рефлектора антенны ЛА

Проанализированы наиболее распространенные технологии прямого формования: пропитка под давлением, пропитка пленочным связующим и вакуумная инфузия и показано, что наименьшую себестоимость имеет технология вакуумной инфузии (рис. 2)

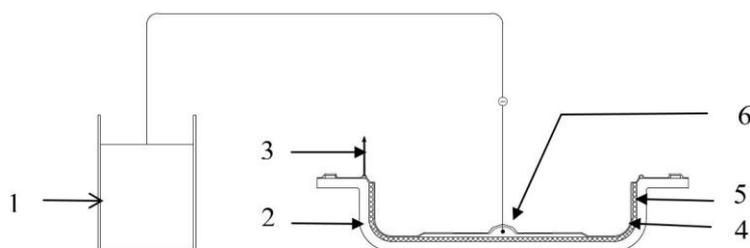


Рисунок 2 – Схема процесса пропитывания методом вакуумной инфузии:
 1– емкость со связующим; 2– оснастка; 3– насос; 4 – вакуумный мешок; 5 – армирующий наполнитель; 6 – канал подачи связующего

Рассмотрены основные проблемы, возникающие в процессе изготовления деталей методов вакуумной инфузии и основные методы моделирования отдельных технологических операций. Проанализирован и обобщен опыт изготовления деталей методов вакуумной инфузии на каждой технологической операции. Основное внимание уделено операциям выкладки и отверждения.

Вторая глава посвящена разработке методики моделирования процесса пропитывания тканей при производстве деталей из ПКМ методом вакуумной инфузии. При изготовлении сверхлегких рефлекторов широкое распространение получили плоские ткани, сечение которых является квадратным (рис. 3, а), тогда как сечение стандартных тканей – круглое (рис. 3, б). Если поверхность оснастки, на которую выкладывается ткань, имеет криволинейную форму, то происходит изменение сетевых углов внутри каждой ячейки (рис. 4).

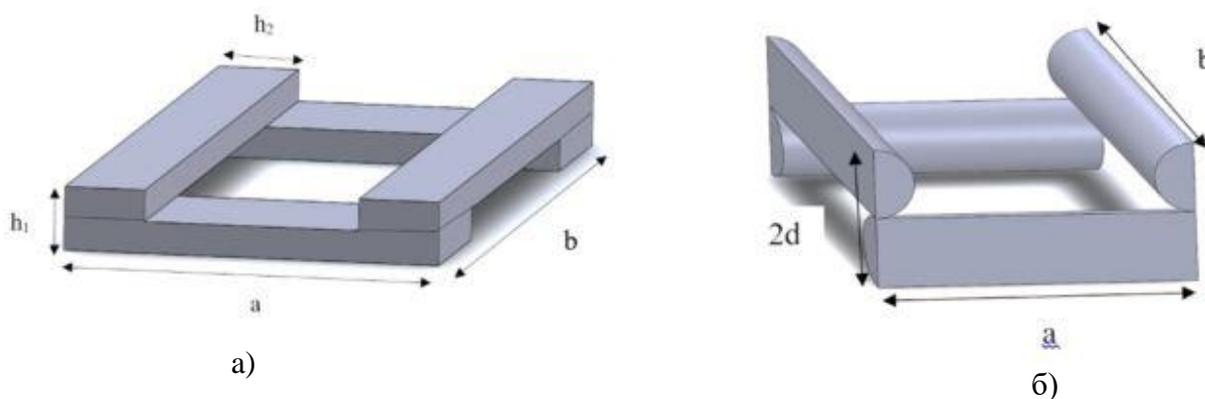


Рисунок 3 – Модель элементарной ячейки структуры плоской (а) и стандартной (б) ткани

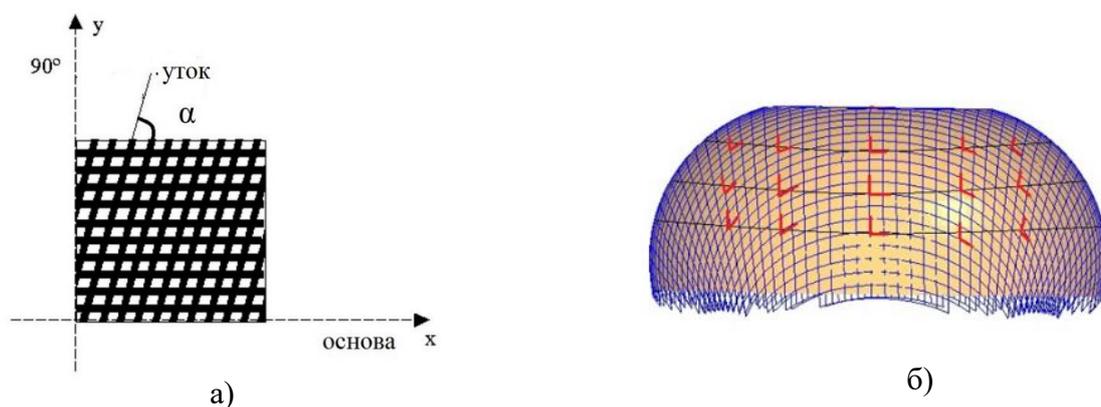


Рисунок 4 – Схемы изменения сетевого угла: значение сетевого угла (а) и сетевой угол при выкладке ткани на поверхность двойной кривизны (б)

Разработаны математические модели, позволяющие оценить кинетику процесса пропитывания при изменении сетевого угла в элементарной ячейке ткани. Показано, что пористость ткани зависит от объема элементарной ячейки и объема нитей в элементарной ячейке,

$$P = 1 - \frac{V_f}{V} \quad (1)$$

В недеформированном состоянии исходный (т.е. начальный) объем элементарной ячейки для плоской ткани равен

$$V_{нач} = abh_1 \quad (2)$$

где a , b , h_1 – геометрические характеристики элементарной ячейки ткани (рис. 3); P – пористость ткани; V_f – объем нитей; V – объем элементарной ячейки.

При выкладке тканей на криволинейную поверхность, ее плотность в разных точках, вследствие изменения сетевого угла будет различна. Объем элементарной ячейки в деформированном состоянии $V_{деф}$ равен

$$V_{деф} = abh_1 \sin \alpha \quad (3)$$

$$P_{min} = 1 - \frac{\pi}{4 \sin 60} \quad (4)$$

Минимальное значение пористости P_{min} , найденное по уравнению (4), составляет 0,09. Объем нитей в элементарной ячейке при деформировании не изменяется

$$V_f = V_{f(нач)} = \frac{h_2 h_1}{2} (a + b) (1 - P_{min}) \quad (5)$$

Начальная пористость $P_{нач}$ ткани и после ее выкладки на криволинейную поверхность (т.е. в деформированном состоянии) $P_{деф}$ равны

$$P_{нач} = \frac{V_{f_{нач}}}{V_{нач}} \quad (6)$$

$$P_{деф} = \frac{V_{f_{деф}}}{V_{деф}}$$

$$\frac{P_{деф}}{P_{нач}} = \frac{ab - \frac{h_2}{2}(a+b)(1-P_{min})}{ab - h_2/2(a+b)(1-P_{min})} \sin \alpha \quad (7)$$

Коэффициент проницаемости в процессе выкладки ткани на криволинейную поверхность оснстки изменяется в соответствии с уравнением (8).

$$K_{деф} = \left[\frac{ab - \frac{h_2}{2}(a+b)(1-P_{min})}{ab - h_2/2(a+b)(1-P_{min})} \sin \alpha \right]^3 \sin^2 \alpha K_{нач} \quad (8)$$

$$K_{1,2} = K_{def} \sqrt{\frac{1 + \cos\alpha}{1 - \cos\alpha}} \quad (9)$$

где $K_{1,2}$ – значения коэффициента проницаемости, K_{def} и $K_{нач}$ – коэффициент проницаемости деформированного и недеформированного состояния.

Для экспериментального определения значений коэффициента проницаемости системы «связующее-ткань» в исходном (т.е. недеформированном состоянии) первоначально исследовался образец, выложенный на плоскую оснастку 600x60 и использована фронтальная подача связующего (рис. 5). Используя уравнение (9) определены значения коэффициентов проницаемости плоских и стандартных тканей (рис. 6). Для сравнения полученных результатов, наряду с тканью Аспро А-60, которая использовалась при изготовлении рефлектора антенны, также были исследованы углеродные ткани марок Аспро А-80 и HEXCEL.



Рисунок 5 – Фото образцов ткани при определении значений коэффициента проницаемости недеформированного состояния

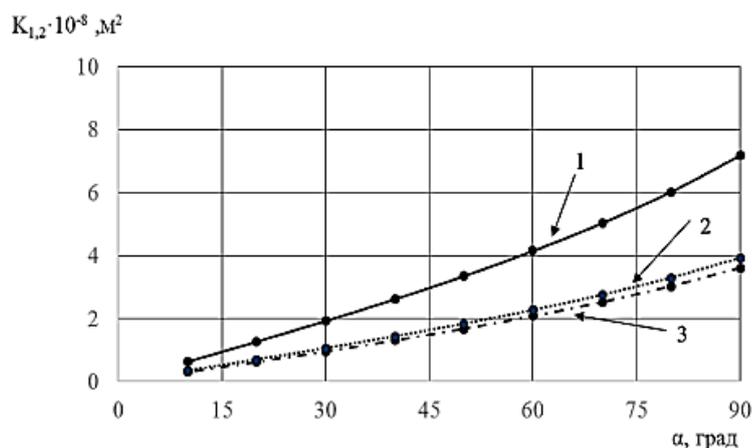


Рисунок 6 – Зависимости коэффициента проницаемости от изменения угла деформированного состояния углеродных тканей: HEXCEL (1), Аспро А-60 (2), Аспро А-80 (3)

Проведенные расчеты показали, что для низкопористых углеродных тканей марок Аспро А-60 и Аспро А-80 при изменении сетевых углов значения коэффициентов проницаемости изменяются в меньшей степени, чем для высокопористой углеродной ткани марки HEXCEL.

Оценку влияния геометрии поверхности оснастки на продолжительность процесса пропитывания проводили на модели в виде сферы с использованием программы RAM-RTM. Поверхность сферы была разбита на треугольные

конечные элементы (для моделирования поверхности рефлектора антенны использовалось 6829 элементов). Результаты моделирования показаны на рис. 7-9.

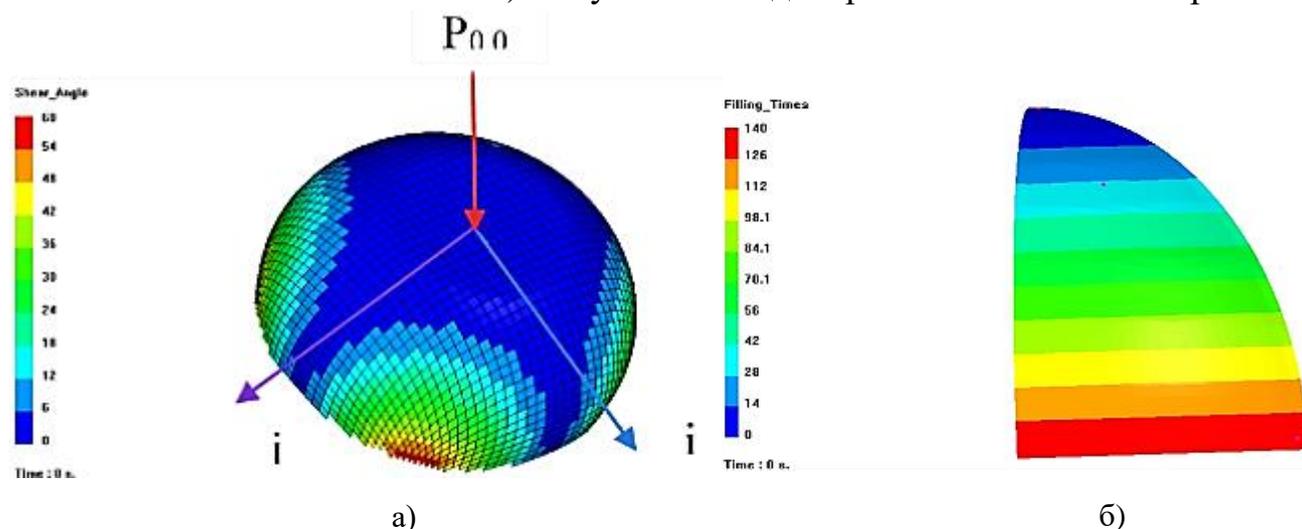


Рисунок 7 – Результаты моделирования параметров процесса пропитывания: сетевого угла (а) и времени пропитывания (б)

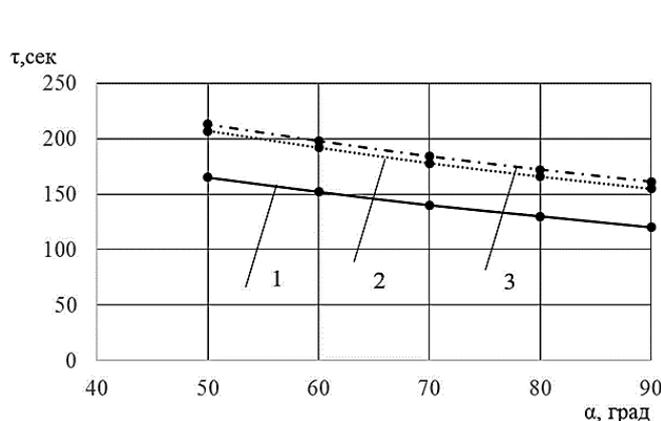


Рисунок 8 – Зависимости времени пропитывания от сетевого угла для углеродных тканей марок: HEXCEL (1), Аспро А-60 (2), Аспро А-80 (3)

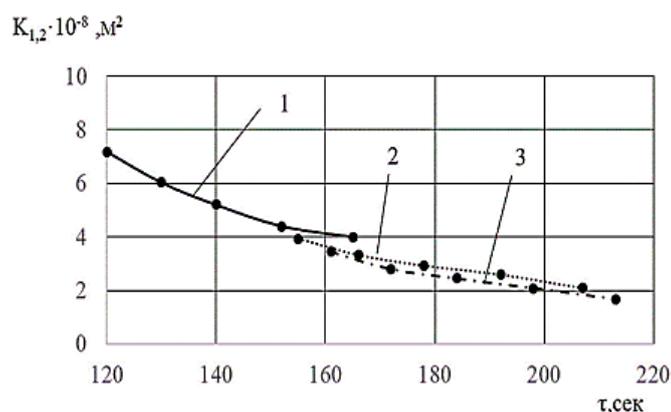


Рисунок 9 – Зависимости времени пропитывания от коэффициента проницаемости угла для углеродных тканей марок: HEXCEL (1), Аспро А-60 (2), Аспро А-80 (3)

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что при выкладке тканей на криволинейную поверхность оснастки происходит изменение сетевого угла. Для обычных и плоских тканей эта величина изменяется от 90° до 36° . При уменьшении сетевого угла значения коэффициента проницаемости также уменьшаются, что приводит к увеличению времени пропитывания. Погрешность между теоретическими и экспериментальными результатами не превышает 3%.

Третья глава посвящена разработке технологических операций выкройки и выкладки ткани на поверхности оснастки при изготовлении рефлекторов антенн.

В работе проведены исследования влияния пористости ткани на ее формообразующие свойства. Моделирование проводилось экспериментально и в программе WiseTex (рис. 10-11).

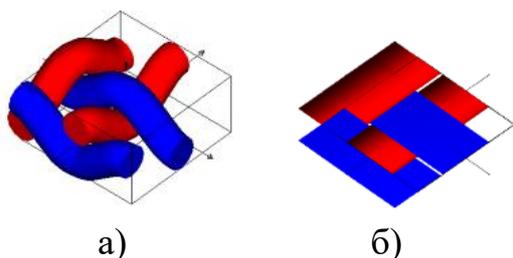


Рисунок 10 – Схема к определению пористости стандартной (а) и плоской (б) ткани

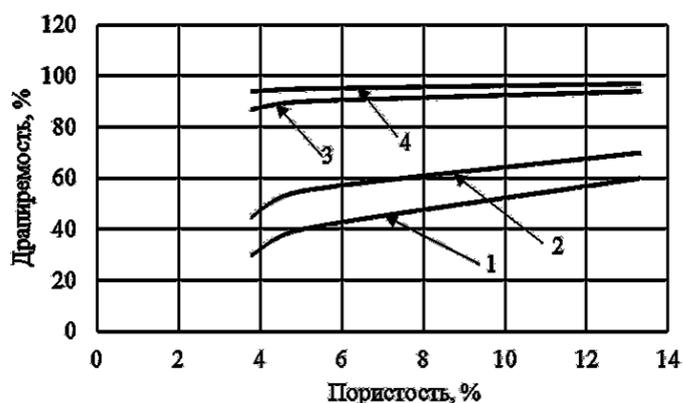
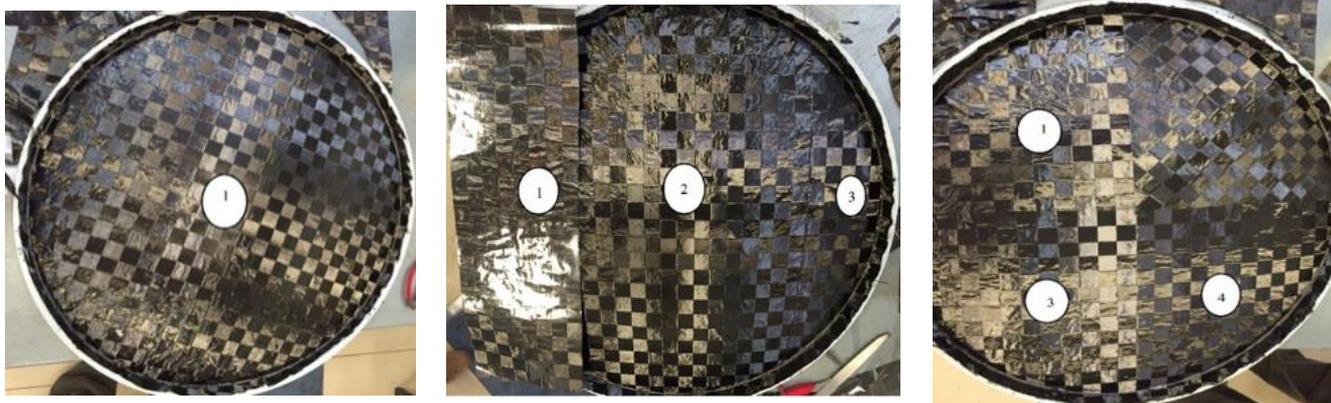


Рисунок 11 – Зависимости драпируемости от пористости при различных схемах выкладки: 1) 0°, 2) 90°, 3) -45°, 4) +45°

В результате проведенных расчетов установлено, что пористость углеродной ткани Аспро А-80 очень низкая и составляет 3,8%, тогда как пористость ткани Нехсел существенно выше и составляет 13,3%. Установлено, что с увеличением пористости ткани ее формообразующие свойства, в том числе и драпируемость, улучшаются.

Качество выкладки ткани на криволинейную поверхность оснастки зависит от ее пористости и определяет наличие (или отсутствие) складок. Образование складок приводит к ухудшению пропитывания и к снижению механических характеристик готового изделия. Для определения наиболее рациональной схемы выкройки углеродной ткани Аспро А-80 в работе были последовательно рассмотрены три варианта, отличающиеся между собой количеством выкроек: для первой схемы – 1, для второй – 3, для третьей – 4 (рис. 12). Для всех трех схем были изготовлены опытные образцы рефлекторов и определено время, затраченное на пропитывание. Схема выкладки для всех трех вариантов составила $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_2$, количество слоев равно 6. Полученные результаты показаны на рис. 13 и в табл. 1. В результате проведенных исследований установлено, что при использовании третьей схемы выкладки имеет место наилучшее качество выкладки, что характеризуется наименьшим количеством складок.



Вариант №1

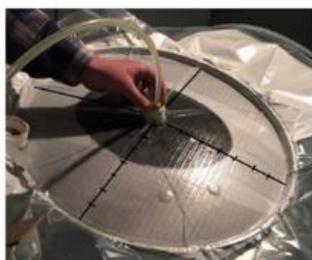
Вариант №2

Вариант №3

Рисунок 12 – Варианты выкладки ткани на поверхность оснастки

Таблица 1 – Время пропитывания при использовании различных схем выкладки

№ варианта схемы выкладки	Кол-во выкроек	Время пропитывания, сек
1	1	220
2	3	230
3	4	225



а) Фото на 70 сек пропитывания



б) Фото на 70 сек пропитывания



в) Фото на 158 сек пропитывания



г) Фото на 158 сек пропитывания

Рисунок 13 – Фото рефлектора в процессе пропитывания:
(а, в) вариант-1, (б, г) вариант-3

В работе изготовлена полномасштабная модель рефлектора антенны (диаметром 1200 мм), экспериментально определено время ее пропитывания (рис. 14, б) и проведено сравнение с результатами моделирования (рис. 14, а).

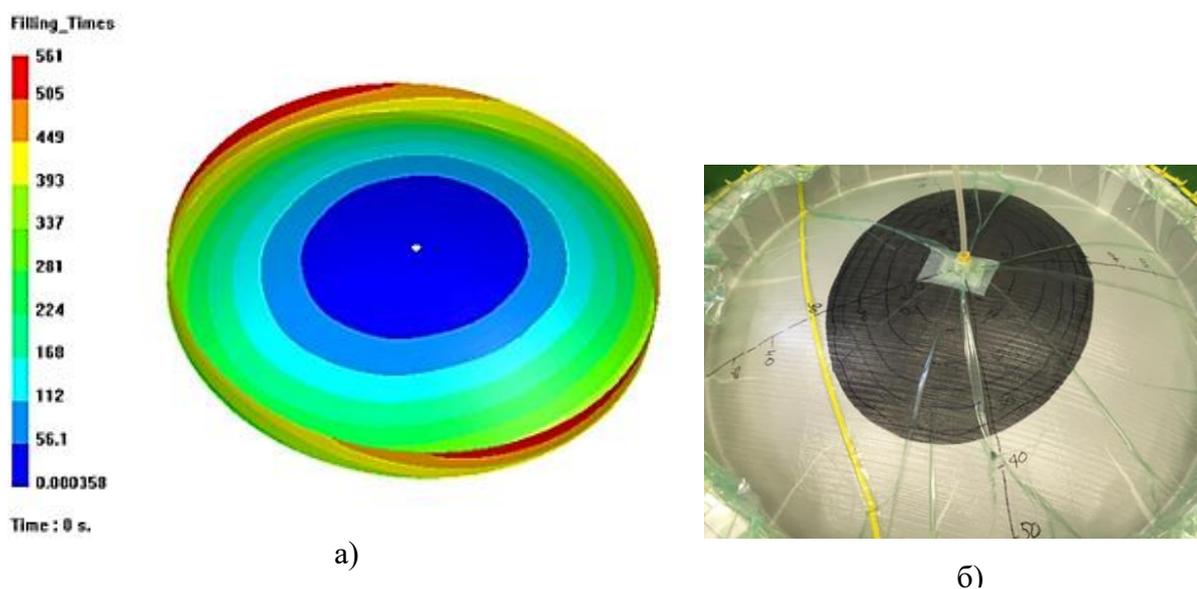


Рисунок 14 – Результаты расчета (а) кинетики процесса пропитывания и фото образца (б) непосредственно в процессе пропитывания

В результате проведенных исследований установлено, что погрешность между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 3%.

Четвертая глава посвящена моделированию кинетики процесса отверждения. При моделировании теплообмена, происходящего в ПКМ в процессе их отверждения, первоначально были определены температурные поля при различных видах теплообмена.

Для моделирования процесса отверждения использована программа Femap NX Nastran. В качестве объекта был выбран рефлектор антенны, диаметром 1200 мм и толщиной 0,6 мм. Модель создана в системе Visual Environment.

Задача математического моделирования решалась в два этапа: определение температурных полей в заготовке рефлектора во время процесса отверждения без и с учетом тепловыделения в процессе химической реакции отверждения.

Для первого этапа моделирования были приняты следующие граничные условия теплообмена в процессе отверждения рефлектора:

1) Теплопередача осуществляется путем конвекции через воздух по режиму отверждения, представленному на рис. 16, коэффициент теплоотдачи $5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$;

2) Имеет место излучение с поверхности рефлектора.

Полученные результаты по распределению температур (без учета тепловыделения) во время процесса отверждения показаны на рис. 15 и 16. В

результате проведенных расчетов установлено, что, заданная температура в 180°C (если при расчетах используется модель без учета тепловыделения), устанавливается на 14240 сек. Таким образом, градиент температур на начальных этапах нагрева не превышает 3°C , а на этапе выдержки он еще меньше и составляет $0,2^{\circ}\text{C}$.

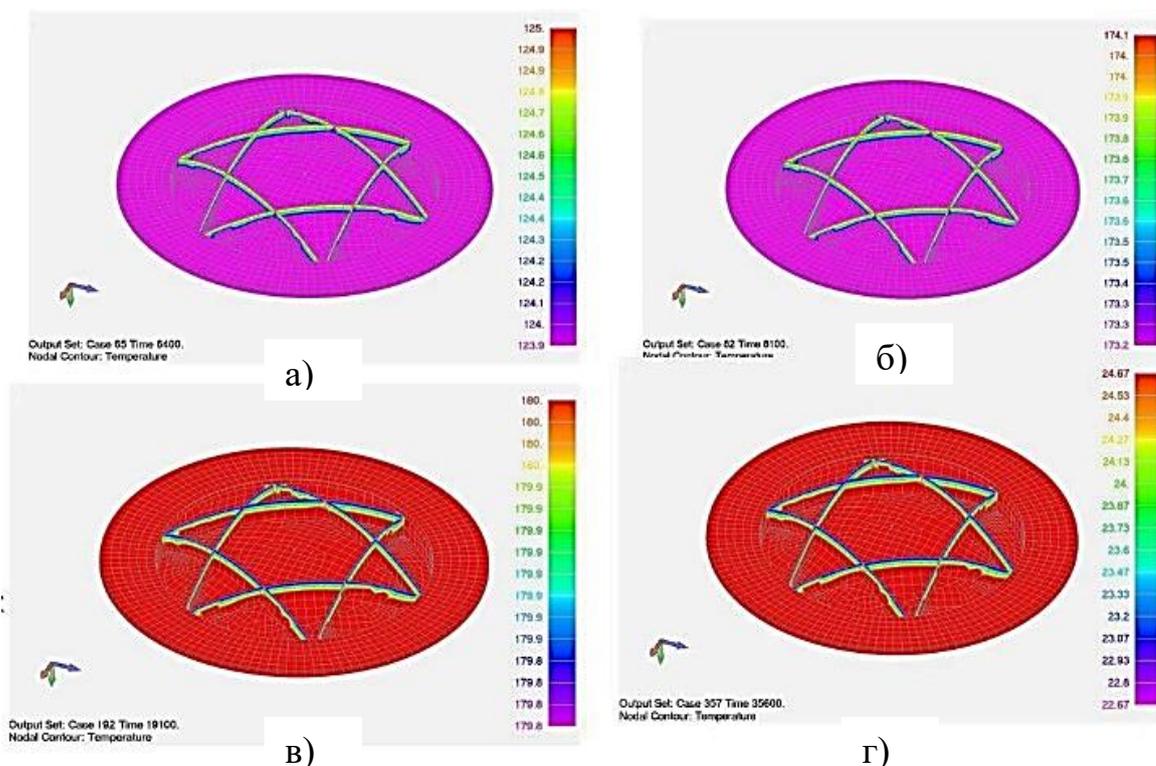


Рисунок 15 – Результаты моделирования режима отверждения, сек: 6400 (а), 8100 (б), 19100 (в) и 35600 (г).

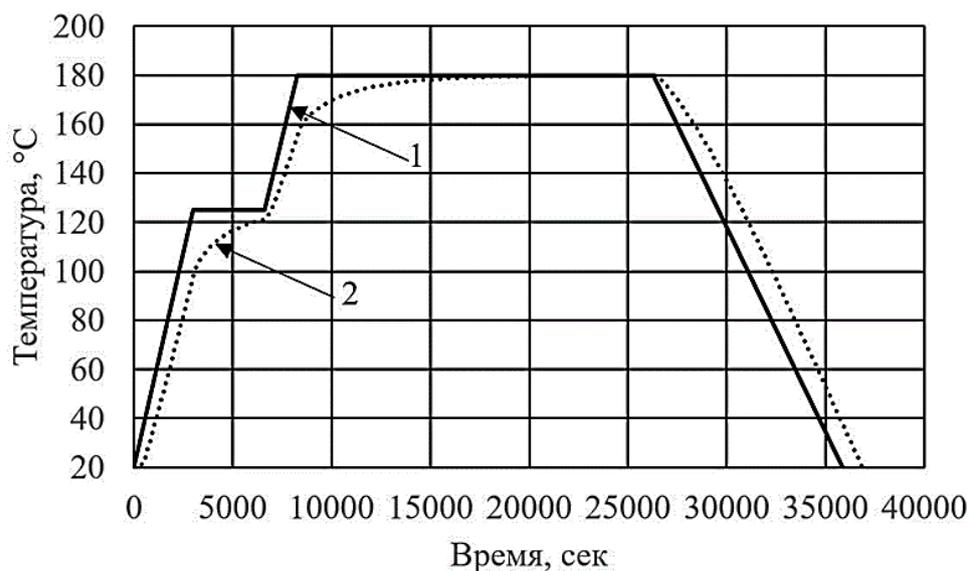


Рисунок 16 – Заданный (1) и фактический (2) режимы отверждения (без учета тепловыделения)

Для учета экзотермического эффекта было использовано уравнение теплопроводности Фурье, которое для модели теплопроводности имеет вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 2k_{xz} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho H_r \frac{d\alpha}{d\tau} \quad (10)$$

где T – температура, k_{xx}, k_{xz}, k_{zz} – теплопроводности анизотропного материала, C_p – удельная теплоемкость, ρ – плотность, H_r – тепловыделения в реакции, α – степень отверждения, $\frac{d\alpha}{d\tau}$ – скорость реакции.

Для экспериментальной оценки количества теплоты, выделяемой в процессе отверждения связующего, использовался дифференциально сканирующий калориметр модели DSC 204 F1 Phoenix. Анализ полученных результатов показал (рис. 17, 18), что увеличение скорости нагрева образца от 1 К/мин до 20 К/мин приводит к увеличению количества выделяемого тепла. Кинетика процесса нагрева также оказывает влияние на температуру, при которой скорость химической реакции становится наибольшей (температура пика), значение которой повысилось от 171,3°C до 202,28°C.

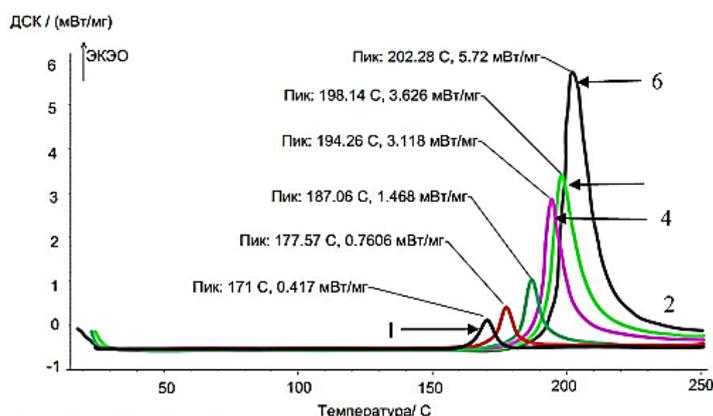


Рисунок 17 – Результаты ДСК: 1 – 1°C/мин; 2 – 2 °C/мин; 3 – 5 °C/мин; 4 – 10 °C /мин; 5 – 15 К°C/мин; 6 – 20 °C/мин

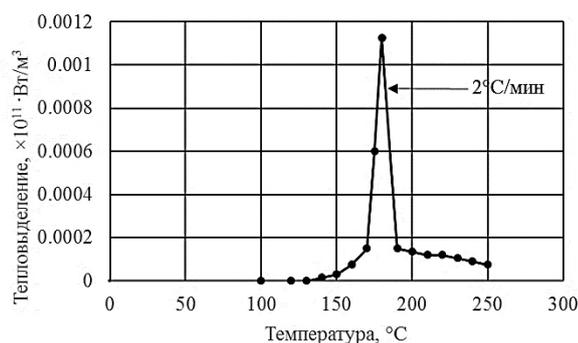


Рисунок 18 – Функция тепловыделения в программе Femap NX Nastran

Для решения задач математического моделирования тепловых процессов использован метод конечных элементов, в программе Femap NX Nastran. Граничные условия для второго этапа моделирования теплообмена в процессе отверждения рефлектора были аналогичными первому этапу моделирования. Кроме этого, дополнительно было учтено тепловыделение, происходящее в процессе отверждения. Некоторые из полученных результатов показаны на рис. 19.

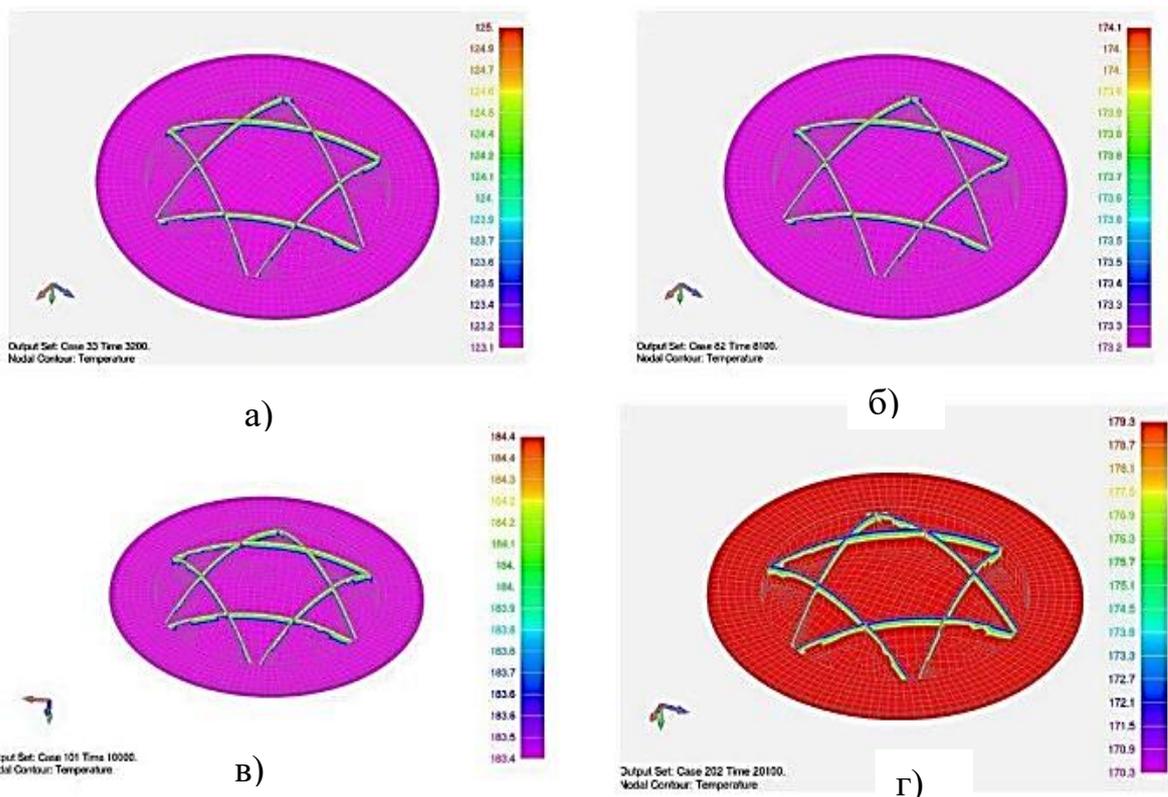


Рисунок 19 – Результаты моделирования режима отверждения: 3200 сек, 8100 сек, 10000 сек и 20100 сек

В результате проведенных расчетов (рис. 20, 21) было установлено, что заданная температура в 180°C устанавливается на 9980 сек (с учетом тепловыделения). Для сравнения теоретических и экспериментальных результатов была изготовлена полномасштабная модель рефлектора антенны диаметром 1200 мм.

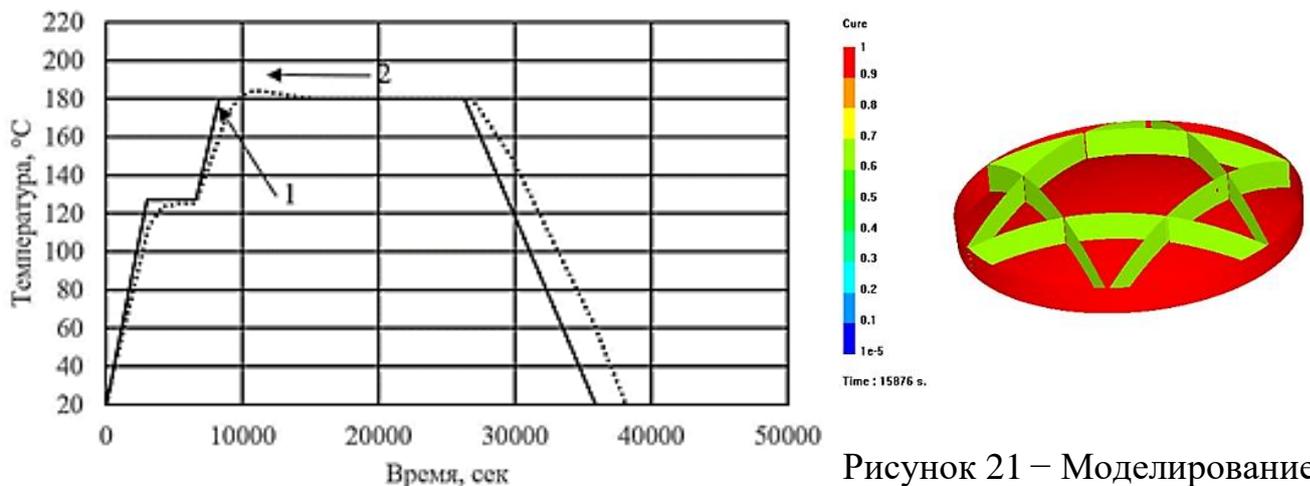


Рисунок 20 – Заданный (1) и фактический (2) режимы отверждения (с тепловыделением)

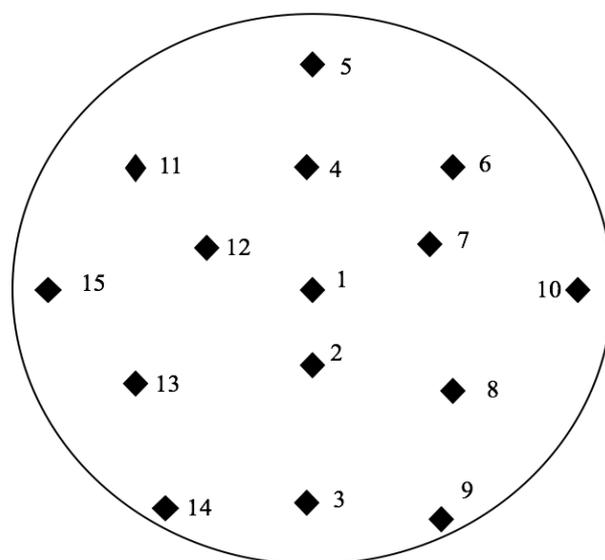
Рисунок 21 – Моделирование процесса отверждения в различные моменты времени: на 15846 секунде

Установлено, что на 16236 сек. нагрева имеет место равномерное температурное распределение образца, что позволяет уменьшать температуру выдержки на первой ступени режима отверждения. В работе была проведена оптимизация режима отверждения. Установлено, что при равной значимости двух критериев (содержание пористости и предел прочности), оптимальной является скорость нагрева $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Для рассматриваемого связующего это позволяет сократить продолжительность процесса отверждения на 71 мин.

Качество изготовленных образцов рефлектора оценивали с использованием компьютерного микротомографа высокого разрешения марки SkyScan 1172. Для исследований были вырезаны образцы из различных участков рефлектора. Используемый микротомограф, наряду с визуализацией структуры, также позволял в автоматическом режиме определять пористость. Полученные результаты показаны на рис. 22 и в табл. 2.



а)



б)

Рисунок 22 – Фото рефлектора (а) с указанием мест (б), из которых были изготовлены образцы для структурного анализа

Таблица 2 – Характеристики рефлектора

№ образца, в соответствии с рис. 22	Пористость, %	Толщина, мм
1	2,7	0,6
2	2,85	0,599
3	2,9	0,598
4	2,6	0,599
5	2,8	0,601
6	2,6	0,6
7	2,8	0,6

№ образца, в соответствии с рис. 22	Пористость, %	Толщина, мм
8	2,85	0,6
9	3	0,6
10	2,9	0,601
11	2,72	0,6
12	2,75	0,6
13	2,87	0,6
14	3	0,601
15	2,95	0,602
16	3	0,598
17	3	0,597

Для измерения точности изготовления профиля поверхности рефлектора использована бесконтактная мобильная измерительная система на базе лазерного радара серии MV200. Лазерный радар позволяет определять горизонтальные и вертикальные углы с погрешностью не более 6,8 мкм/м. Анализ полученных результатов показывает, что средняя толщина различных образцов отражающей поверхности рефлектора отклоняется от теоретической формы не больше 3 мкм. В результате проведенных исследований установлено, что погрешность изготовления формы по профилю не превышает 15 мкм.

Влияние точности изготовления на диаграмму направленности рефлектора исследовалось для геометрических моделей рефлектора с различным отклонением от заданной формы. При построении моделей использовались сплайн-функции. На рисунках 23-25 представлены диаграммы направленности для моделей с отклонениями 0,003 и 0,015 мм.

В результате проведенных исследований установлено, что с ростом погрешности качество диаграммы направленности рефлектора ухудшается. Для заданной частоты уровень погрешности составляет 0,015 мм, что меньше допустимого.

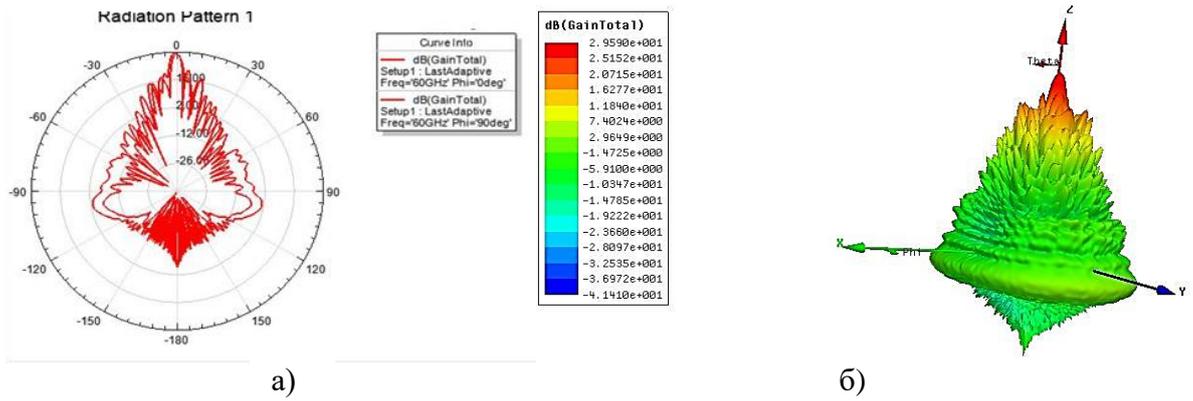


Рисунок 23 – Диаграмма направленности рефлектора заданной формы: (а) 2-D, (б) 3-D

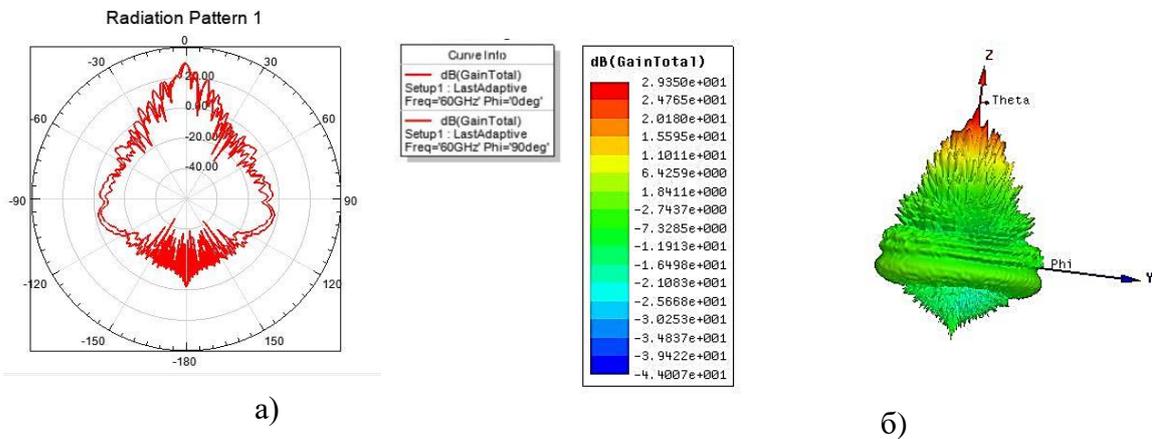


Рисунок 24 – Диаграмма направленности рефлектора с погрешностью 0,003 мм: (а) 2-D, (б) 3-D

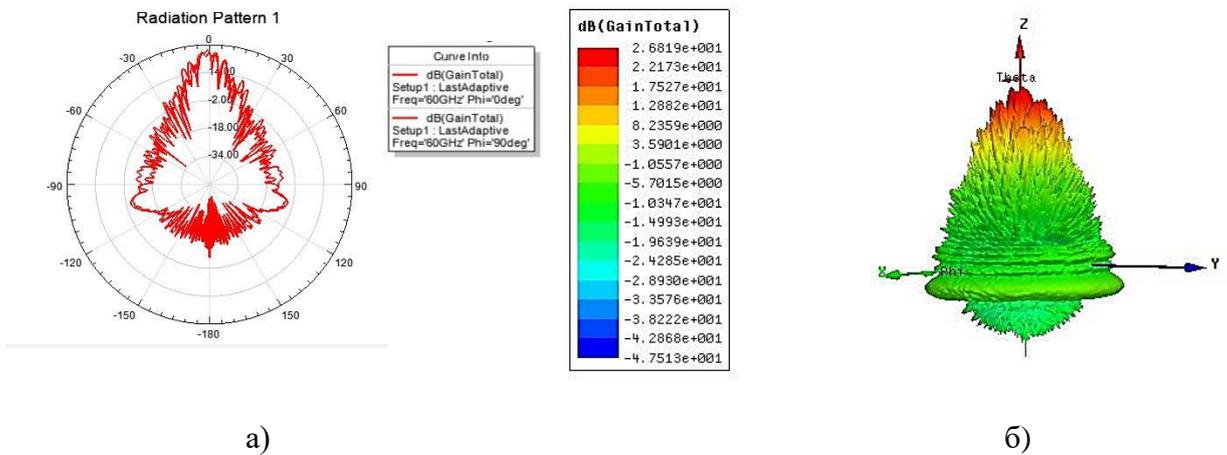


Рисунок 25 – Диаграмма направленности рефлектора с погрешностью 0,015 мм: (а) 2-D, (б) 3-D

Одновременно с рефлектором, были изготовлены образцы для проведения механических испытаний на растяжение и межслоевой сдвиг (табл. 3).

Результаты проведенного анализа показали, что предлагаемая технология изготовления рефлектора антенны методом вакуумной инфузии при использовании углеродной ткани марки Аспро А-80 и эпоксидного связующего марки Araldite LY 8615/XB 5173, позволяет получать углепластики с высокими механическими свойствами.

Таблица 3 – Механические характеристики углепластиков

Механические свойства	Технологический режим	
	Предлагаемый	Базовый
Предел прочности при растяжении, МПа	1850	1700
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа	72	65

По сравнению с базовым вариантом прочность при растяжении выросла на 8,8%, прочность при межслоевом сдвиге на 10,7%. Повышение прочности, вероятно, связано с низкой пористостью, значения которой не превышают 3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, посвященной совершенствованию технологии производства тонкостенных конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов, позволяющей повысить их функциональное качество, получены следующие результаты:

1. Разработаны методики для определения коэффициента проницаемости тканей различной структуры и сетевых углов при выкладке ткани на поверхность оснастки двойной кривизны. Установлено, что проницаемость ткани зависит от ее пористости, так при увеличении пористости с 3,8% до 13,3% для используемого эпоксидного связующего, значения коэффициентов проницаемости увеличиваются на 49%. Величины сетевых углов зависят от криволинейности используемой оснастки, и для детали типа «полусфера», изменяются от 90° до 36°. Скорость пропитывания возрастает с увеличением сетевого угла и коэффициента проницаемости.

2. Исследовано влияние сетевых углов на кинетику процесса пропитывания в зависимости от угла, под которым производится подача связующего. Установлено, что при уменьшении сетевого угла увеличивается продолжительность процесса пропитывания. Однако, при подаче связующего под углом 45° имеет место противоположная зависимость, т.е. в этом случае при уменьшении сетевого угла продолжительность процесса пропитывания уменьшается.

3. Определены значения времени пропитывания, которые составили 180 с (при использовании ткани марки HEXCEL) и 219 с (при использовании ткани марки Аспро А-60). Погрешность между экспериментальными и теоретическими результатами не превысила 3%.

4. Для рефлектора зеркальной космической антенны диаметром 1200 мм экспериментально определены рациональные схемы выкладки и выкройки по критерию отсутствия складок. Для ткани заданного типа плетения и пористости определены координаты критических точек, установлено минимальное расстояние между единичными элементами тканной структуры, и выбрана рациональная схема раскроя и выкладки.

5. Разработаны математические модели, позволяющие описать кинетику процесса отверждения с учетом влияния экзотермических эффектов. Установлено, что заданная температура в 180°C достигается за 14240 с (для моделей без учета тепловыделения) или за 9980 с (для моделей с учетом тепловыделения). Погрешность между экспериментальными и теоретическими результатами не превысила 9%. Оптимизирован технологический процесс отверждения, продолжительность которого сократилась на 71 мин.

6. Проведена оценка качества изготовленного рефлектора по критериям пористости (максимальное значение не превышало 3%). Установлено, что по сравнению с базовым вариантом прочность увеличилась: при растяжении на 8,8%, при межслоевом сдвиге на 10,7%.

7. Проведено моделирование радиотехнических характеристик рефлектора на частоте 60 ГГц, построены диаграммы направленности. Погрешности изготовленного рефлектора составили по толщине 3 мкм, по профилю 15 мкм, что полностью соответствует заданным техническим требованиям.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Марычева А.Н., Пье Пху Маунг, Малышева Г.В. Исследования влияния структур тканых материалов на кинетику процесса формирования изделий из стеклопластиков методом вакуумной инфузии // Дизайн. Материалы. Технология. 2015. Т. 5. № 40. С. 64-66.

2. Malysheva G.V., Kirsanova E.A., Pyi Phyo Maung, Tumasova M.S. Rigidity of glass, carbon, and organic yarns of special-purpose fabrics // Fibre chemistry. 2016. Vol. 48. No 2. pp.140-142.

3. Pyi Phyo Maung, Malysheva G.V., Gusev S.A. A study of the effect of network angle of fabrics on kinetics of impregnation upon molding of articles made from carbon plastics // Polymer science. Series D. 2016. No 4. pp. 407-410.

4. Пье Пху Маунг, Малышева Г.В. Моделирование кинетики процесса пропитывания при производстве рефлекторов зеркальных космических антенн из углепластиков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2016. № 5. С. 38-47.

5. Пье Пху Маунг, Малышева Г.В., Татарников О.В. Отработка технологических режимов отверждения при изготовлении и ремонте изделий из композитов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2016. № 8. С.7-11.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS

6. Pyi Phyو Maung, Tatanikov O., Malysheva G. Optimization of the curing process of a sandwich panel // IOP Journal. Conference series. Materials science and engineering. 2016. Vol.153, No. 1. 6 p.

7. Pyi Phyو Maung, Malysheva G., Romanova I. Optimization of the rheological properties of epoxy resins for glass and carbon reinforced plastics // IOP Journal. Conference series. Materials science and engineering. 2016. Vol. 153, No. 1. 6 p.

Публикации в других научных изданиях

8. Пье Пху Маунг Методика измерения вязкости эпоксидных связующих // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. № 11. С. 21-24.

9. Пье Пху Маунг, Марычева А.Н., Малышева Г.В. Особенности процесса пропитывания при изготовлении деталей двойной кривизны из полимерных композиционных материалов // Будущее машиностроения России: Сб. докладов 8-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. С. 966-968.

10. Пье Пху Маунг, Тумасова М.С., Малышева Г.В. Исследование формообразующих свойств углеродных и стеклянных тканей // Будущее машиностроения России: Сб. докладов 8-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. С. 971-973.

11. Пье Пху Маунг Определение технологических режимов процесса пропитывания поверхностей двойной кривизны // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды 40-х Академич. чтений по космонавтике. М.: Комис. РАН по разраб. научн. наследия пионеров освоения космич. пространства, 2016. С. 43-44.

12. Пье Пху Маунг Оптимизация режима отверждения при изготовлении высококачественных изделий из полимерных композиционных материалов // Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкции: Труды 2-ой международной конференции. М.: ИМАШ РАН. 2016. С. 85-87.

13. Пье Пху Маунг Исследование влияния структуры ткани на кинетику процесса пропитывания рефлектора космических антенн // XLII Гагаринские чтения: Сб. тезисов докладов международной молодежной научной конференции. 2016. Т. 3. С. 43-44.

14. Пье Пху Маунг, Малышева Г.В. Отработка технологии изготовления рефлектора космической антенны // Все материалы. Энциклопедический справочник с Приложением «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». 2017. № 5. С. 11-15.