

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Пье Пху Маунг

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

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных
аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Мальшева Г.В.

Москва 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ СВОЙСТВ.....	12
1.1. Современные представления о конструкциях высо- кочастотных тонкостенных рефлекторов	12
1.2. Технологии производства изделий из терморек- тивных связующих и тканых наполнителей	15
1.3. Методы моделирования кинетики процесса пропит- ывания	19
1.4. Методы оценки формообразующих свойств арми- рующих тканей.....	22
1.5. Моделирование процессов отверждения связую- щих	26
1.6. Выводы по 1 главе.....	29
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТЫВАНИЯ ТКАННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ	31
2.1. Исследование вязкости эпоксидных связующих	31
2.2. Исследование структуры углеродных тканей.....	35
2.3. Исследование влияния сетевого угла на кинетику процесса пропитывания	38
2.4. Разработка математической модели элементарной ячейки тканного наполнителя при его выкладке на криволинейную поверхность оснастки	41
2.5. Определение коэффициентов проницаемости	45
2.6. Исследование влияния сетевого угла на проницае- мость	48

2.7. Выводы по 2 главе	56
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ВЫКЛАДКИ	58
3.1. Исследование влияния пористости на формообразующие свойства тканей	58
3.2. Определение рациональной схемы выкладки.....	62
3.3. Исследование влияния схемы выкладки на качество и продолжительность технологического процесса ...	65
3.4. Разработка технологической операции выкладки ...	71
3.5. Выводы по 3 главе	74
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ.....	76
4.1. Модели теплообмена в процессе отверждения полимерных композиционных материалов без учета экзотермических эффектов	76
4.2. Модели теплообмена в процессе отверждения полимерных композиционных материалов с учетом экзотермических эффектов	85
4.3. Моделирование экзотермических эффектов в процессе отверждения эпоксидного связующего	87
4.4. Моделирование кинетики процесса отверждения рефлектора зеркальной космической антенны	94
4.5. Задача оптимизации скорости нагрева режима отверждения	97
4.6. Оценка качества рефлектора.....	99
4.7. Выводы по 4 главе.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение в современной авиационной, ракетно-космической и другой технике, что связано с их хорошими деформационно-прочностными, технологическими, теплофизическими и др. свойствами, а также высокой надежностью. Углепластики относятся к одним из наиболее перспективных конструкционных материалов, поскольку обладают высокой жесткостью, прочностью и уникальным комплексом теплофизических свойств.

При разработке новых изделий расширяется диапазон рабочих нагрузок, увеличиваются температуры, давления, что требует создания новых материалов и технологий формования изделий, отвечающих этим требованиям.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве конструкционного материала при изготовлении рефлекторов антенн летательных аппаратов (ЛА) широкое распространение получили углепластики, что связано с комплексом их уникальных теплофизических характеристик, обеспечивающих выполнение требований по термостабильности в условиях космического пространства, сравнительно малой плотностью 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. Использование при отверждении изделий из углепластиков автоклава приводит к существенному повышению их себестоимости, что во многом ограничивает области их применения. Разработка новых технологий изготовления изделий из ПКМ, которые исключают необходимость использования автоклавной технологии и изготовления препрега, представляется обладающей существенной практической значимостью.

Технологии производства изделий из углепластиков постоянно совершенствуются и среди множества различных задач, связанных с повышением их качества, не меньшее внимание уделяется снижению себестоимости. Снижение себестоимости может быть обеспечено путем использования непропитанных тканей. При технологии инфузионной пропитки под вакуумом – VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion), процесс нанесения связующего совмещен с операциями выкладки и отверждения. Это позволяет существенно снизить себестоимость изготовления, однако пористость таких деталей выше, что приводит к снижению их механических характеристик. Именно 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 и теплостойкости 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.

При изготовлении высокоточных конструкций точность изготовления, оценивается несколькими показателями, значения которых определяют по всей площади рефлектора (чем меньше значения показателей и меньше их дисперсия, тем выше точность). В качестве показателей точности в работе используются: равнотолщинность и пористость.

Точность изготовления оказывает влияние на величину коэффициента усиления и вид диаграммы направленности. Повышение точности при одновременном снижении себестоимости может быть достигнуто за счет оптимизации технологического режима формования.

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

СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существенный вклад в идентификацию теплообменных процессов внесли работы Алифанова О.М., Леонтьева А.И., Полежаева Ю.В., Просунцова П.В., Резника С.В., и др. Теоретические и экспериментальные исследования процессов теплообмена при отверждении изделий из полимерных композиционных материалов детально разработаны в трудах Резника С.В., Просунцова П.В., Дмитриева О.С., D. Hickey, S. Bickerton, V. Pillai, A. Beris, P. Dhurjati, C. Loos and G.S. Springer, Han and S.Y.Lee, T.A. Bogetti and J.W. Gillespie, P.R. Ciriscioli, Q. Wang, R. Watkins, S.C. Mantell, и др. Однако, в своих работах они не рассматривали влияние скорости процессов нагрева на общее количество выделяемой теплоты и продолжительность процессов нагрева.

Структурные особенности тканей, используемых в технологиях формования методом вакуумной инфузии, были рассмотрены в работах A. Endruweit, P. Ermanni, B. Verleye, R. Croce и др. Ими установлено влияние сетевого угла на характеристики драпируемости и формообразующие свойства. Они также исследовали влияние геометрии элементарной ячейки ткани на величину пористости. Все это позволило разработать теоретические основы для оценки такой важнейшей характеристики, как проницаемость, применительно к конкретным системам ткань-связующее.

Однако в научной литературе отсутствует информация о математических моделях определения коэффициента проницаемости с учетом изменения сетевого угла при выкладке ткани на поверхности изделий сложных форм. Также в научной литературе отсутствует информация о моделях кинетики процесса отверждения углепластиков с учетом тепловыделения.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

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

Основные задачи:

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

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 И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Теоретическая значимость диссертации 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 диссертации 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.

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 Sky-

Scan 1172. Механические испытания образцов углепластиков на растяжение и межслоевой сдвиг проводили на универсальной машине Zwick/RoellZ100 TEW, прочность при ударе определяли на маятниковом копре РН 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.

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.

СТЕПЕНЬ ДОСТОВЕРНОСТИ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

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

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;

- Международной конференции «Трансфер авиационно-космических технологий в ключевые секторы экономики» в рамках Чемпионата мира по композитам, Республика Татарстан, г. Казань, 29 октября 2016;
- 2-ой Международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» ИМАШ РАН, Россия, г. Москва, 18-20 октября 2016;
- 12-й Международном научном симпозиуме «Передовые технические системы и технологии», Россия, г. Севастополь, 10-17 сентября 2016;
- XIII Конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН, Россия, г. Москва, 13-15 апреля 2016;
- XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», МАИ, Россия, г. Москва, 12-15 апреля 2016;
- XL Академических чтениях по космонавтике, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, 26-29 января 2016;
- 4th International Conference «Advanced Composite Materials and Technologies for Arduous Applications», United Kingdom, Wrexham, 5-6 November 2015;
- Молодежной конференции «Фундаментальные научные основы современных комплексных методов исследований и испытаний материалов, а также элементов конструкций», ВИАМ, Россия, г. Москва, 30 ноября 2015;
- X Молодежной научно-инженерной выставке «Политехника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, 7-10 октября 2015, 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;
- 11-й Международном научном симпозиуме «Передовые технические системы и технологии», Россия, г. Севастополь, 11-20 сентября 2015;

– Студенческой весне, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, 20-23 апреля 2015;

– Конкурсе «Инновационные технологии материалов и изделий текстильной и легкой промышленности» МГУДТ, Россия, г. Москва, 11-12 ноября 2014.

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 14 научных статей, из них 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ

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

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ СВОЙСТВ

1.1. Современные представления о конструкциях высокоточных тонкостенных рефлекторов

В настоящее время в различных странах разрабатываются конструкции современных рефлекторов антенн ЛА, в том числе и космических аппаратов (КА) с твердой отражающей поверхностью [74, 75, 127, 132-135]. Например, компания Thales Alenia Space, Бельгия (рис. 1.1, а) разработала рефлектор диаметром 2,3 м, компания Astrium и Thales Alenia Space (рис. 1.1, б), разработала сверхлегкий рефлектор диаметром 3,8 м. Аналогичные работы в настоящее время выполняются и другими крупнейшими фирмами: например, HPS, Германия (рис. 1.1, в) [153], ULR Mark 2 (рис. 1.1, г) и др. [127]. В настоящей работе рассматривается конструктивно-силовая схема рефлектора космической антенны, разработанного под руководством проф. Резника С.В. (Рис. 1.2) [64, 127, 134].

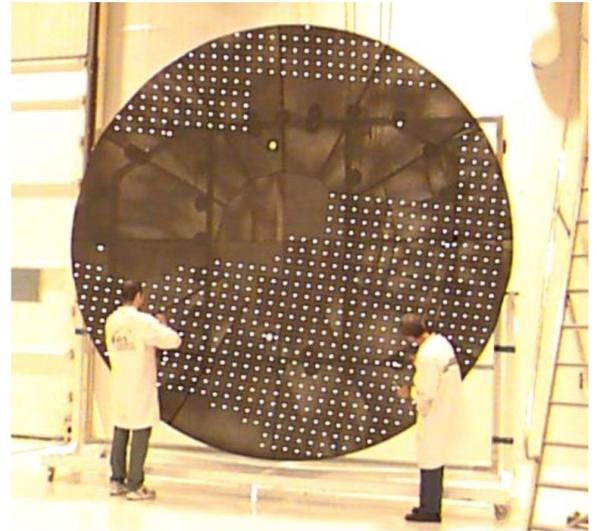
Вопросы оптимизации конструкций из композиционных материалов подробно рассмотрены в работах Алифанова О.М. [2], Васильева В.В. [13], Полилова А.Н. [63], Просунцов В.И. [64] и др. В работах Резника С.В. и его учеников [53-55, 74-77] наибольшее внимание уделено вопросам оптимизации теплонагруженных конструкций, к которым и относится рефлектор ЛА.

Под конструктивно-силовой схемой рефлектора будем понимать совокупность его основных параметров, определяющих форму и размеры рефлектора, принципы конструктивного исполнения и используемые материалы. 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 КСС с оребрением «шестиконечная звезда» с высотой ребер 90 мм и толщиной ребер

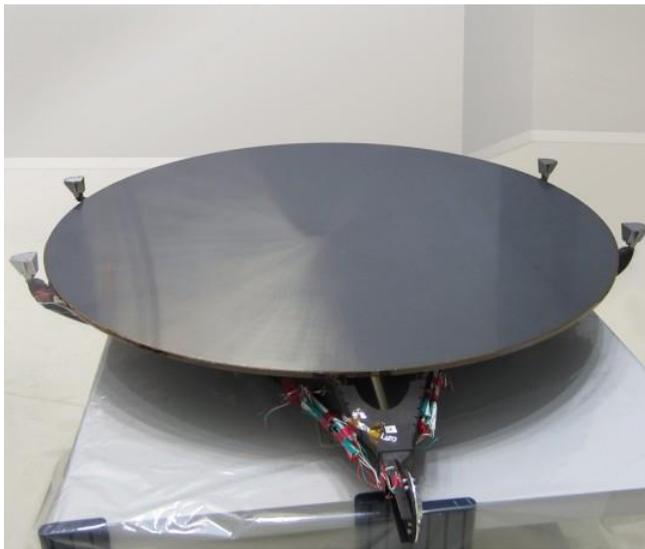
0,6мм, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора С.В. Резника [130-135].



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.1. Сверхлегкие рефлекторы зеркальных антенн ЛА:
а) фирмы Thales Alenia Space, Бельгия [138], б) Thales Alenia Space [130], в) HPS, Германия [153], г) ESA ULR Mark 2 [138]

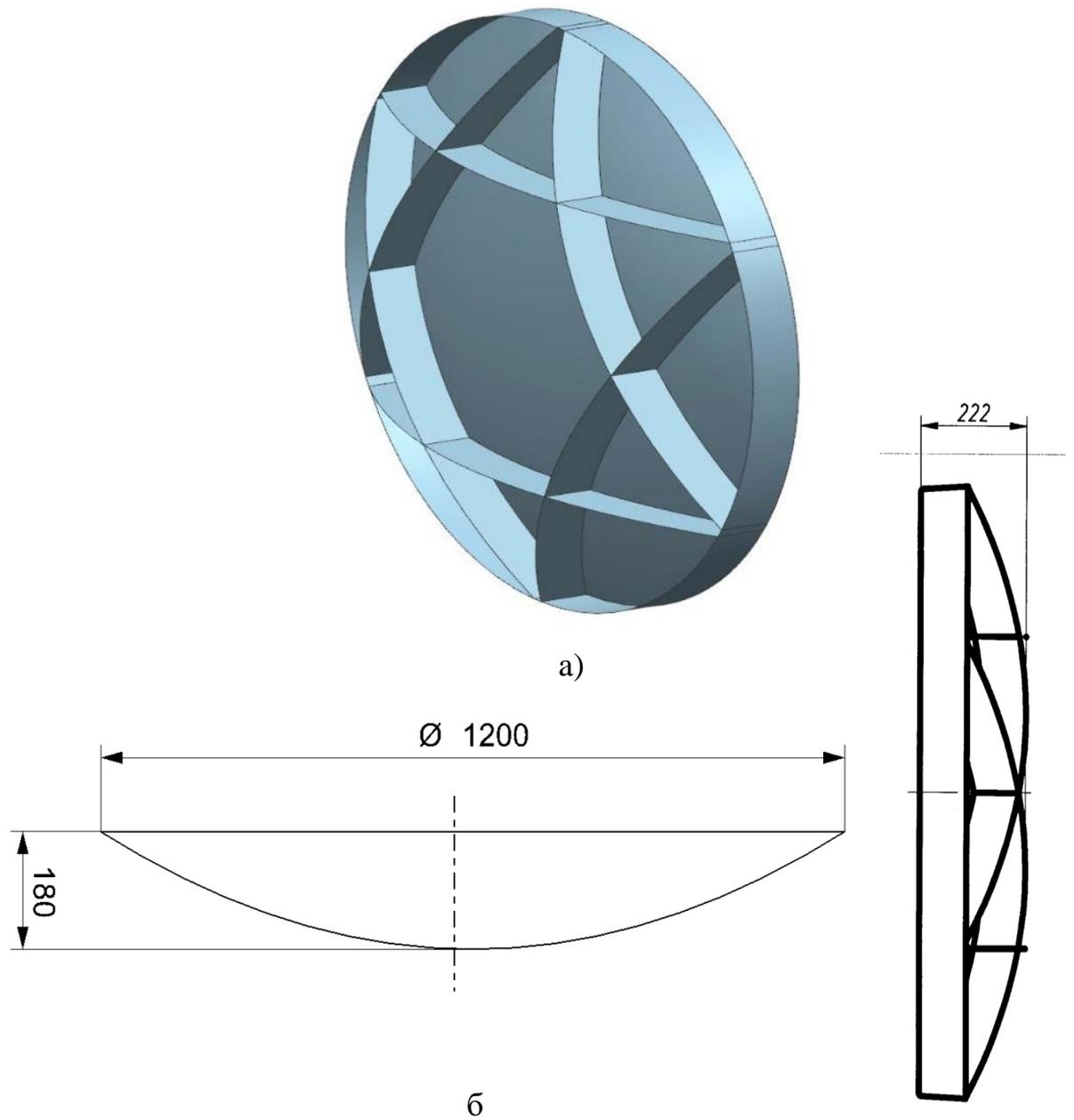


Рис. 1.2. Конструктивная схема рефлектора антенн ЛА:
а) 3-Dмодель рефлектора; б) схема с указанием габаритных размеров
[64, 127, 131,134]

Применяемые материалы для изготовления данного рефлектора представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. – Применяемые материалы для изготовления рефлектора

Материалы	Плотность, кг/м ³	Модуль упруго- сти, ГПа	Прочность при растяжении, МПа	КЛТР, К ⁻¹
Аспро- А80	1780	290	6000	$6,98 \times 10^7$
Huntsman LY8615 US/XB 5173	1250	3	45	70×10^{-6}

В данной работе не планировались дополнительные исследования, связанные с выбором материалов, однако при исследовании формообразующих свойств углеродной ткани Аспро-А80 также будут использованы другие типы тканей, а при исследовании кинетики процессов пропитывания – другие типы эпоксидных связующих, что позволит не только сравнить между собой материалы, но и выбрать наиболее технологичный.

1.2. Технологии производства изделий из терморезистивных связующих и тканых наполнителей

Традиционно при изготовлении деталей из ПКМ использовали препреги, которые изготавливали по растворной (используется с середины XX века по настоящее время) или расплавной (используется с конца XX века по настоящее время) технологиям [61]. Данные препреги используются при изготовлении деталей из органопластиков [19, 20], стеклопластиков [4, 9, 39, 52] и углепластиков [4, 9, 21]. В последнее десятилетие во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ) были разработаны клеевые препреги [22]. Использование клеевых препрегов, совместно с автоклавным режимом отверждения, позволило свести к минимуму пористость и получить детали с максимально высокими прочностными характеристиками

[22,51]. Однако, себестоимость препрегов высока, а их жизнеспособность, даже при хранении в холодильнике, не превышает 1 года. Таким образом, несмотря на высокое качество изделий из ПКМ, изготовленных по препреговой технологии, они постепенно вытесняются прямыми методами формования.

К прямым, т.е. не препреговым, методам формования относятся [7, 10, 26, 89,125]:

1. Пропитка под давлением (Resin Transfer Molding- RTM) [25];
2. Пропитка пленочным связующим (Resin Film Infusion – RFI) [33];
3. Вакуумная инфузия (Vacuum Assisted Resin Infusion –VARI) [46].

Суть технологии пропитки под давлением (RTM) заключается в выкладке армирующего наполнителя в форму, которая герметизируется, и далее (через дренажную систему) в нее под давлением подается связующее (рис. 1.3). После пропитывания форма помещается в электропечь, где происходит процесс отверждения. К преимуществам этой технологии (по сравнению с технологией ручной выкладки) относится: высокая точность, высокое качество (минимальное содержание пор) и возможность изготовления деталей сложной формы.

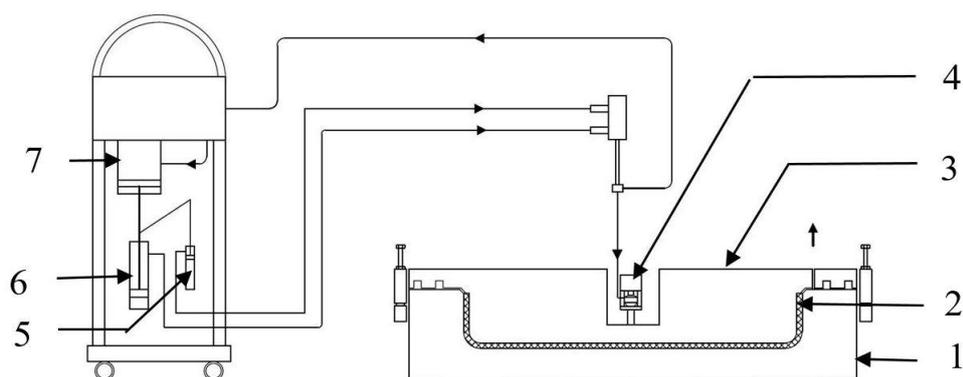


Рис. 1.3. Схема установки процесса пропитывания под давлением (RTM):
 1 – нижний элемент оснастки; 2 – армирующий наполнитель; 3 – верхний элемент оснастки; 4 – канал для подачи связующего; 5, 6 – компоненты связующего; 7 – насос

Однако, высокая стоимость оснастки и используемого оборудования, привели к тому, что эта технология является эффективной только в условиях серийного производства. Кроме этого, при использовании данной технологии имеются ограничения на размеры и геометрию формуемой детали. Однако, несмотря на эти недостатки, данная технология широко используется при изготовлении лопастей вентиляторных двигателей, монолитных обтекателей, элементов механизации крыла и т.д.

Пропитка пленочным связующим RFI (Resin Film Infusion) предназначена для изготовления крупногабаритных конструкций из ПКМ (рис. 1.4). При использовании метода RFI для пропитки наполнителя применяется связующее в виде пленки, которая чередуется со слоями ткани. Помещенный между пуансоном и матрицей пакет предварительно размещают в вакуумном мешке. Пропитка происходит в процессе нагрева за счет снижения вязкости связующего. Достаточно часто при такой технологии пропитывания используется автоклавный режим отверждения.

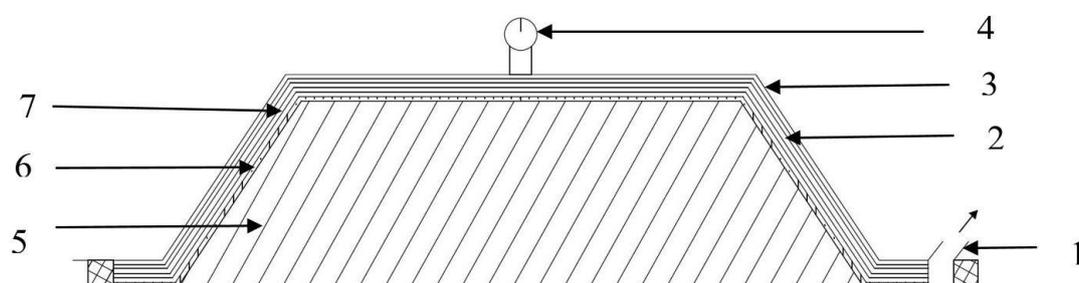


Рис. 1.4. Схема установки процесса пропитывания методом RFI:

- 1 – насос; 2 – жертвенный слой; 3 – вакуумный мешок; 4 – манометр;
5 – оснастка; 6 – армирующий наполнитель и пленочное связующее; 7 –
разделительная пленка

К преимуществам технологии RFI относится снижение времени процесса пропитывания за счет осуществления пропитки в поперечном сечении и возможность проводить точный контроль за содержанием связующего в получаемом изделии из ПКМ. Метод RFI позволяет частично устранить не-

достатки технологии RTM. К недостаткам данной технологии относятся жесткие требования к реологическим свойствам пленочного связующего и сложность моделирования процесса пропитки с помощью существующего программного обеспечения.

Технология вакуумной инфузии (Vacuum Infusion - VI) в последнее десятилетие является одним из самых популярных методов изготовления изделий из ПКМ [6, 7]. Этот метод по своей сути близок к технологии RTM, однако процесс растекания связующего обеспечивается за счет разряжения, создаваемого внутри вакуумного мешка (рис. 1.5). По сравнению с методом RTM при этой технологии существенно снижаются затраты на оборудование, меньшая энергоемкость и трудоемкость.

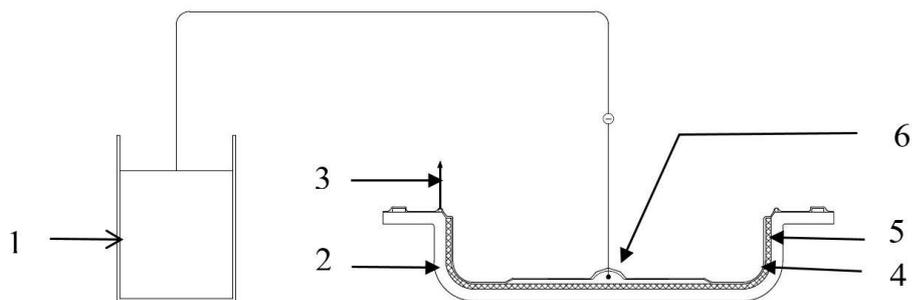


Рис. 1.5. Схема процесса пропитывания методом вакуумной инфузии:
1—емкость со связующим; 2— оснастка; 3— насос; 4 — вакуумный мешок; 5 — армирующий наполнитель; 6 — канал подачи связующего

По мнению ряда специалистов [12], технология вакуумной инфузии является главной альтернативой технологии контактного формования и автоклавного отверждения, особенно в условиях единичного производства [7].

При разработке технологических режимов изготовления изделий методом вакуумной инфузии, требуется решить целый ряд технологических задач. Одна из них – это определение места установки канала для подачи связующего. Если изделие имеет симметричную форму, например рефлектор, то подачу связующего осуществляют в центре. Если канал подачи свя-

зующего установлен неправильно, то это приводит к избыточному содержанию связующего, повышению пористости и, соответственно, ухудшению механических свойств конструкции.

Вторая (не менее важная) технологическая задача – это определение кинетики процесса пропитывания, которая в одинаковой степени зависит от реологических свойств связующего и структуры используемой ткани. Проницаемость тканых наполнителей зависит от многих факторов: строения ткани, типа плетения, геометрических и жесткостных характеристик нитей и т.д. Структура ткани оказывает большое влияние на качество ее выкладки на поверхность криволинейной оснастки. При несоответствии сетевого угла кривизне, может иметь место образование складок, что приведет не только к потере внешнего вида изделия, но и к ухудшению его механических свойств.

Таким образом, для обеспечения высокого качества изделий из ПКМ, изготавливаемых методом вакуумной инфузии, необходимо решить сложную технологическую задачу, связанную с оптимизацией режимов основных технологических операций.

1.3. Методы моделирования кинетики процесса пропитывания

В научной литературе вопросам моделирования механических характеристик ПКМ уделено существенно меньше внимание [6, 13, 63, 70-72], чем их реологическим свойствам. Процессы течения имеют важнейшее значение при оптимизации технологических режимов при изготовлении деталей методами литья из металлов [73], сплавов [81, 82], высокопористых [2], анизотропных материалов [3], несжимаемых жидкостей [83] и др.

Теоретические основы реологического поведения связующих изложены в работах Воюцкого С.С. [15], Шрамм Г. [97], Торнера Р.В. [90] и др. и широко использованы для практического применения при формовании деталей из термопластов [16, 24] и реактопластов [35].

Результаты моделирования реологического поведения олигомерных и полимерных терморезактивных связующих приведены в работах [12, 29, 45, 92, 112]. Для моделирования напряженно-деформированных характеристик изделий из ПКМ большое распространение получили численные методы расчета [28, 30, 54, 55, 58, 78, 80, 84]. По-прежнему широко используются экспериментальные методы оценки тех или иных свойств ПКМ [85], в том числе и адгезионных [17, 18, 31, 32, 37, 40, 41], которые в очень существенной степени определяются процессами смачивания и растекания связующего по поверхности волокнистого наполнителя. Неразрушающие методы контроля также используются при оценке свойств уже отвержденных деталей из ПКМ [57, 58, 59, 60]. В то же время, все экспериментальные методы позволяют оценивать качество уже готовых ПКМ, тогда как для уменьшения времени на отработку технологии, целесообразно использовать программное обеспечение, которое позволяло бы обрабатывать технологические режимы в существенно более короткие сроки.

Современное программное обеспечение можно условно разделить на две группы: первые позволяют выполнять анализ в двухмерной постановке, вторые – в трехмерной. К первой группе относятся программы Laminator, Verctor Lam Cirrus и др., ко второй – ANSYS, Nastran, Femap и др. На рынке представлены различные программные продукты: FiberSim (Vistagy / Siemens PLM Software), Digimat (e-Xstream / MSC Software Corp.), Helius (Firehole Composites / Autodesk), Composite PrepPost, ESA Comp (Altair Engineering) и др. [26, 105, 150].

По оценкам авторов работ [46, 47, 124, 126], для моделирования кинетики процесса пропитывания при использовании метода вакуумной инфузии, наибольшее распространение получила программа PAM-RTM. Данный программный продукт позволяет выполнять расчет всех основных технологических режимов: оптимизировать схему подачи/отвода связующего, расположение вакуумных портов, схему укладки армирующего наполнителя,

реологические свойства связующего, прогнозировать фронт распределения связующего, наличие сухих зон, пористость степень полимеризации и т.д.

В табл. 1.2 приведены результаты экспертной оценки, где специалисты в области проектирования изделий из ПКМ оценили свойства программных продуктов по пяти бальной системе (5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – удовлетворительно, 2 – плохо) [126,145]. Как видно из приведенных данных, наиболее высокую оценку получила программа PAM-RTM.

Таблица 1.2. – Сравнение эффективности программного обеспечения

Возможности	PAM-RTM	LIMS	RTM-Worx	Flow 3D
Кинетика пропитывания	4	3	0	0
Стоимость	2	3	1	3
Кинетики отверждения	4	3	0	0
Время моделирования	4	2	3	2
Итоги	14	11	4	5

Пример расчета кинетики процесса пропитывания эпоксидным связующим углеродной ткани Twillc использованием программы PAM-RTM показан на рис. 1.6.

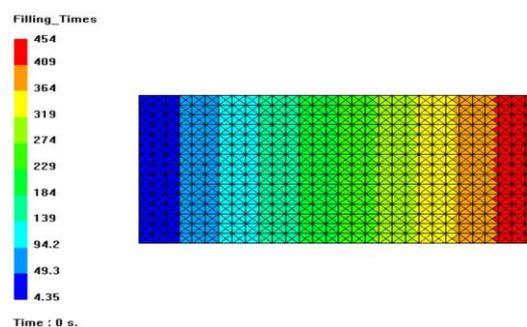


Рис. 1.6. Пример моделирования процесса пропитывания в программе PAM-RTM (время пропитывания – 454 сек)

Однако в литературе отсутствуют значения коэффициентов проницаемости используемых типов тканей, которые необходимы при проведении расчетов. Также отсутствует стандартная методика определения значений коэффициентов проницаемости и пропитывания и поэтому требуются дополнительные исследования по ее разработке.

1.4. Методы оценки формообразующих свойств армирующих тканей

Структуру тканого наполнителя в процессе его выкладки на поверхность оснастки, традиционно рассматривают в соответствии с теорией П.Л. Чебышева [93], согласно которой два семейства линий, пересекающихся на поверхности, образуют сеть. Каждая ячейка такой сетки представляет собой четырехугольник. В процессе выкладки может быть использована обычная ткань, для которой характерно круглое сечение волокон (рис. 1.7, а) или плоская, сечение которой является квадратным (рис. 1.7, б). При выкладке ткани на поверхность оснастки происходит изменение сетевых углов внутри каждой ячейки и сетевой угол любой текстильной ткани (рис. 1.8) представляет собой угол, между нитями основы и утка [11,36,108,140-146].

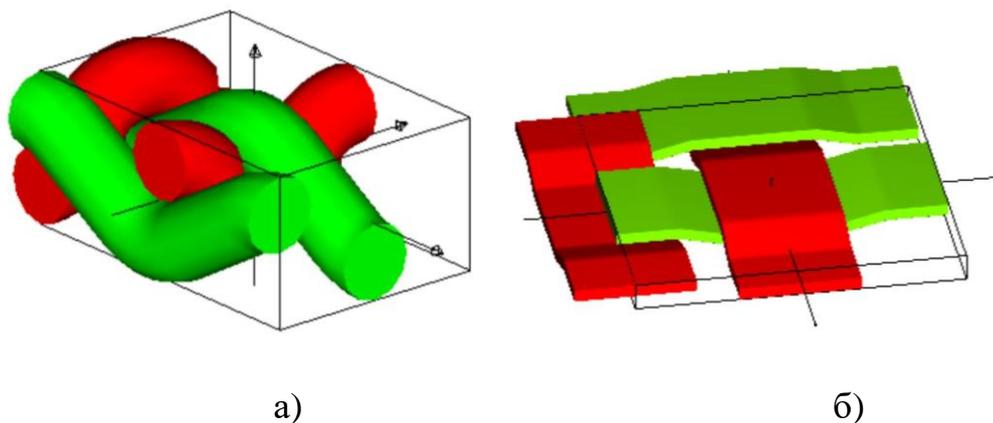


Рис. 1.7. Схема элементарной ячейки стандартной (а) и плоской (б) ткани

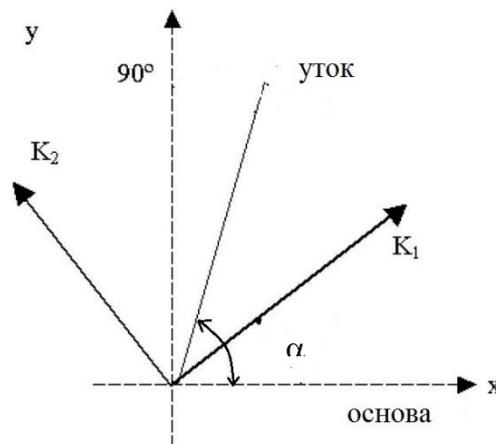


Рис. 1.8. Сетевой угол между нитями основы и утка

Максимальное значение сетевого угла составляет 90° , минимальное зависит от структуры ткани, жесткостных и деформационных характеристик нитей. Как правило, изменение сетевого угла происходит в диапазоне $30-90^\circ$ [93].

В работах Stepan V. Lomov [114, 118, 119] представлены результаты моделирования структур тканей с различными плетениями, полученные с использованием программы WiseTex (рис 1.9). Однако данный программный продукт не позволяет оценивать кинетику процесса пропитывания с учетом реологических свойств связующих.

Проницаемость – одна из важнейших формообразующих характеристик структуры ткани. Проницаемость характеризует наличие (между нитями основы и утка) свободного объема. Именно этот объем в процессе пропитывания будет занимать связующее. Коэффициент проницаемости меняется при изменении сетевого угла в процессе выкладки ткани на криволинейную поверхность. Наибольшее распространение при изготовлении изделий из ПКМ получили ткани с симметричной структурой, у которых коэффициент проницаемости K_1 (по основе) и K_2 (по утку) равны.

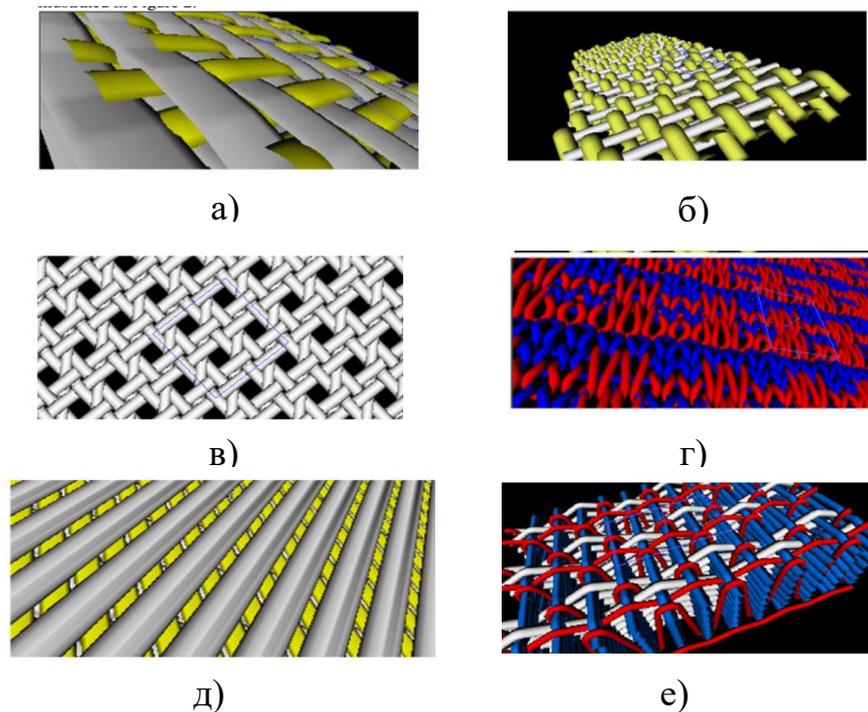


Рис. 1.9. Модели структур тканей, выполненные в программе WiseTex: а) плоская арамидно-стеклянная ткань; б) не плоская арамидно-стеклянная ткань; в) ткань сложного плетения; г) вязанное полотно из 2-х типов нитей; д) однонаправленное полотно; е) вязанное полотно из 3-х типов нитей [119]

Структура ткани оказывает существенное влияние на кинетику процесса пропитывания [137,139]. В работе Endruweit A., Ermanni P. [106] рассмотрены зависимости коэффициента проницаемости стандартной ткани с различными геометрическими параметрами ячейки (длиной, шириной элементарной ячейки – a и радиусом – r) от угла сдвига (рис 1.10). Аналогичные результаты представлены в работах K.J. Ahn, J.C. Seferis [98] и Hossein Golestanian [110], которые исследовали применимость уравнения Козени-Кармана [99, 102,103,113] для определения проницаемости ткани (все измерения они проводили на углеродной ткани полотняного плетения).

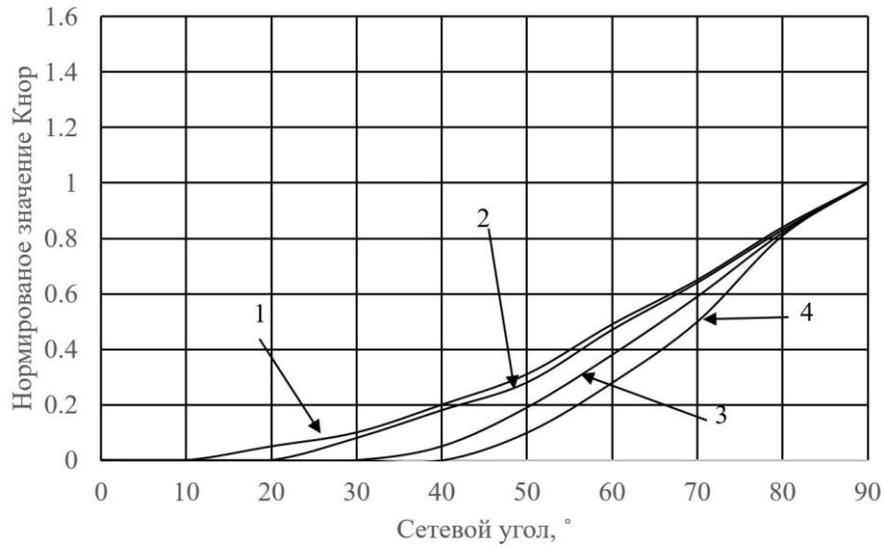


Рис. 1.10. Зависимость коэффициента проницаемости ткани $K_{\text{нор}}$ от сетевого угла в зависимости от радиуса r и геометрического параметра нити элементарной ячейки: 1) $r=0,1a$; 2) $r=0,2a$; 3) $r=0,3a$; 4) $r=0,4a$ [111]

В работах В. Verleye, R. Croce исследовано влияние геометрии ячейки на проницаемость [142, 143] и проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных (рис. 1.11).

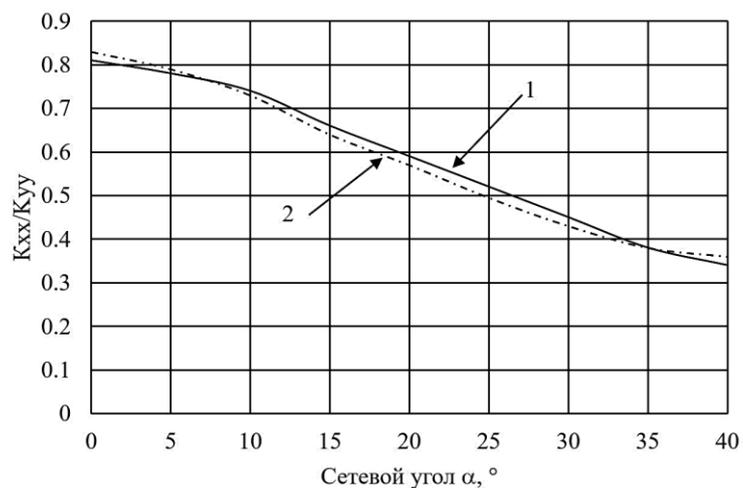


Рис. 1.11. Влияние сетевого угла на проницаемость:
1) теоретические; 2) экспериментальные значения [138]

Проведенный анализ литературы показал, что наибольшее влияние на кинетику процесса пропитывания оказывает структура ткани, характеризующая коэффициентом проницаемости. В то же время, вопросы влияния сетевого угла на скорость процессов пропитывания в зависимости от кривизны используемой оснастки в научной литературе освещены недостаточно.

1.5. Моделирование процессов отверждения связующих

Качество изделий из ПКМ формируется на последней технологической операции – отверждения, и именно по этой причине ее многие исследователи [1, 7, 9, 53, 86, 111] относят к наиболее ответственной и важной, поскольку на этой стадии формируются основные физико-механические свойства, структура и геометрические характеристики изделия.

Теоретические основы теплопроводности представлены в работах Алифанова О.М. [2, 3], Беляева Н.М. [8], Михеева М.А. [56], Новикова И.И. [62], Резника С.В. и его учеников [53, 54, 75-77, 130, 131] и др. [79, 87, 96].

При выборе температурного режима отверждения конкретного изделия из ПКМ, исследуют кинетику процесса перехода связующего из жидкого состояния в гелеобразное и твердое с учетом влияния теплофизических свойств ткани [5, 23, 147, 148].

Широкое распространение для исследования кинетики процессов отверждения получили методы термического анализа [88] и в первую очередь метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), который позволяет определять теплоемкость, энтальпию, температуру начала химической реакции и ее окончание, количество выделяемого (или поглощаемого) тепла и т.д. [10, 14, 27, 34, 42-44, 51]. При использовании ДСК существенную роль играет скорость нагрева. Современная аппаратура позволяет варьировать ее от 1 К/мин до 100 К/мин (такая высокая скорость нагрева обычно используется для инициирования сгорания) [14, 34]. Поскольку перенос тепла от печи к образцам не является мгновенным, то существует некоторое

термическое запаздывание, причем, чем выше скорость нагрева, тем больше запаздывание [43]. Чтобы приблизиться к равновесным условиям, следует нагревать как можно медленнее, однако на практике такая медленная скорость нагрева приводит к очень существенному увеличению продолжительности процесса отверждения и, как следствие, к увеличению себестоимости изделия.

Существует множество работ по исследованию оптимального режима отверждения. В работе Neeraj R. [123] определены оптимальные режимы отверждения для углепластика на основе ткани AS4 и связующего 3501-6с использованием Sequential Quadraticprogramming (рис.1.12).

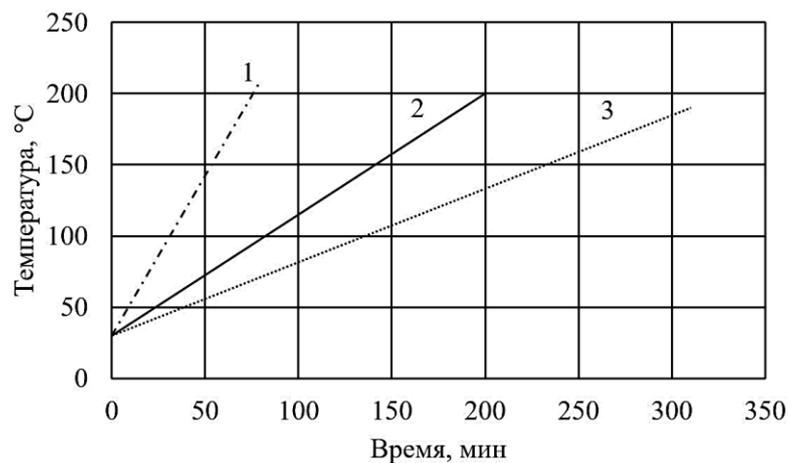


Рис. 1.12. Результаты моделирования режима отверждения в зависимости от толщины образца: 1) 0,5 дюйм; 2) оптимальный режим; 3) 1,0 дюйм [123]

В работе Дмитриева О.С. [23] и его коллег рассчитаны зависимости режимов отверждения в зависимости от теплофизических свойств используемых тканей и толщины формируемого изделия (рис. 1.13).

В работе D. Hickey и S. Bickerton [109] исследована зависимость кинетики отверждения от реологических свойств связующего (рис.1.14).

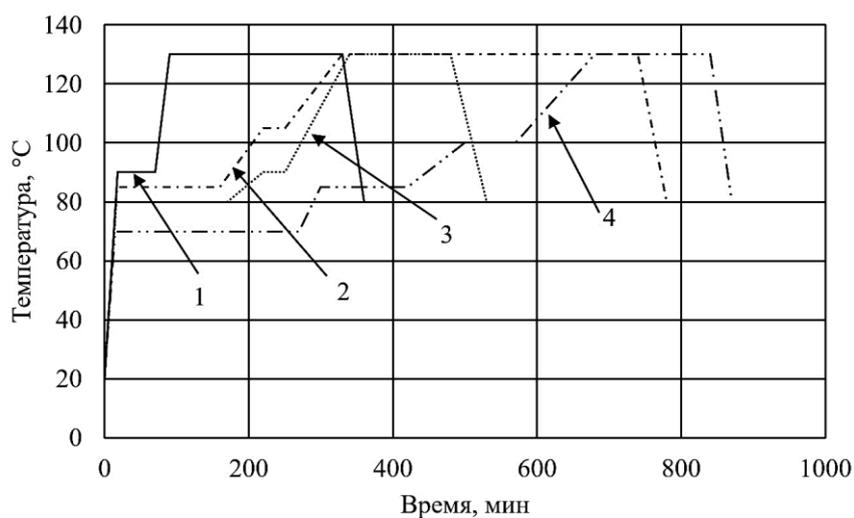


Рис. 1.13. Регламентированные (1) и экспериментально установленные режимы отверждения плоских изделий из ПКМ толщиной 30мм для: 2) углепластика; 3) стеклопластика; 4) органопластика [23]



Рис. 1.14. Зависимость реологических свойств связующего Ampreg 22 от степени его отверждения при температуре $T=25^{\circ}\text{C}$

Для оптимизации режимов отверждения чаще всего используют экспериментальные методы, подбираю те или иные режимы, и экспериментально определяют температуру на поверхности отверждаемой детали. Именно такой подход использовался в работах M.L.Costa, W.I. Lee, M. Li,

T.A. Bogetti and J.W. Gillespie, P.R. Ciriscioli, A. Loos, G. Springer и др. [100,104,107, 115,116,117,120,122]. Несмотря на то, что такой подход не гарантирует оптимальные параметры процесса отверждения и приводит к увеличению стоимости, он получил широкое распространение в самых различных отраслях промышленности [7,136].

В работах Rai и Pitchumani [123] представлены результаты моделирования температуры отверждения с использованием программы *sequentialquadraticprogramming*. Однако вопрос о методике определения исходных значений скорости процесса нагрева и ее влияние на количество выделяемой теплоты, в их работах не рассматривался.

Таким образом, для выбора и оптимизации режима отверждения необходимо проводить учет тепловыделения, в зависимости от кинетики процесса нагрева, теплофизических свойств используемого наполнителя и химической природы связующего.

1.6. Выводы по 1 главе

Проведенный анализ литературы позволяет сделать следующие выводы:

1. Технология вакуумной инфузии является перспективной, поскольку позволяет формировать изделия из углепластиков, отличающихся более низкой себестоимостью, чем при использовании препреговых технологий.
2. Существующие методы определения скорости процесса пропитывания требуют дальнейшей доработки, поскольку не учитывают влияние сетевого угла и кривизны поверхности оснастки.
3. Программное обеспечение PAM-RTM позволяет моделировать скорость процессов пропитывания, однако для моделирования требуется знание значений коэффициентов пористости тканей.
4. Для повышения качества деталей из ПКМ на операции отверждения используют многоступенчатый режим нагрева, что позволяет обеспечить

заданную температуру на различных участках формуемых изделий. Однако при таком подходе требуются длительные экспериментальные исследования, что приводит к повышению себестоимости изделий из ПКМ.

5. Разработка методики моделирования процессов отверждения с учетом выделяющего тепла позволила бы существенно сократить время на оптимизацию технологических режимов.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОПИТЫВАНИЯ ТКАННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

В данной главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований кинетики процесса пропитывания углеродной ткани эпоксидным связующим в зависимости от структуры ткани [46, 48, 50, 65, 66, 121, 129].

2.1. Исследование вязкости эпоксидных связующих

Одной из основных характеристик тканых наполнителей является коэффициент проницаемости, значение которого зависит не только от строения текстильных материалов, типа плетения, геометрических характеристик нитей, но и от реологических свойств связующего. Динамическая вязкость является основной реологической характеристикой связующего, и для ее измерения используются различные типы вискозиметров [45].

Для оценки вязкости олигомерных связующих используются ротационные вискозиметры, которые оснащены несколькими типами шпинделей, отличающихся геометрическими размерами конусов (рис.2.1). В настоящей работе для оценки вязкости использовался вискозиметр Brookfield CAP 2000+, оснащенный двумя шпинделями, рекомендованными для одного и того же диапазона вязкости, отличающимися между собой конусным углом и радиусом.

Результаты проведенных экспериментальных исследований (табл. 2.1) показали, что в диапазоне вязкости от 1,5 до 37,5 Па·с могут быть использованы и шпиндель №1 и шпиндель № 5. Для расчета вязкости, скорости и напряжения сдвига использовалась программа Carcalc 32, интерфейс которой показан на рис. 2.2. Данная программа позволяла в автоматическом режиме строить кривые вязкости и кривые течения, в том числе и при повышении температуры связующего.

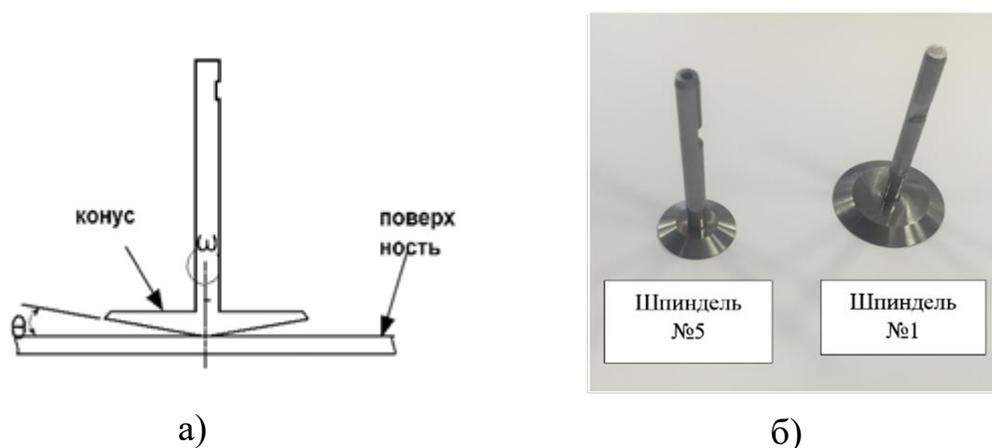


Рис. 2.1. Схема измерения вязкости (а) и фото шпинделей, используемых для ее измерения (б)

Таблица 2.1. – Характеристики шпинделей, используемых при определении вязкости эпоксидного связующего

№ шпинделя	Конусный угол, °	Радиус шпинделя, см	Диаметр шпинделя, см	Длина шпинделя, см	Оптимальный диапазон вязкость, Па·с
01	0,45	1,511	0,475	5,271	0,09-37,5
05	1,8	0,953	0,475	5,271	1,5-60

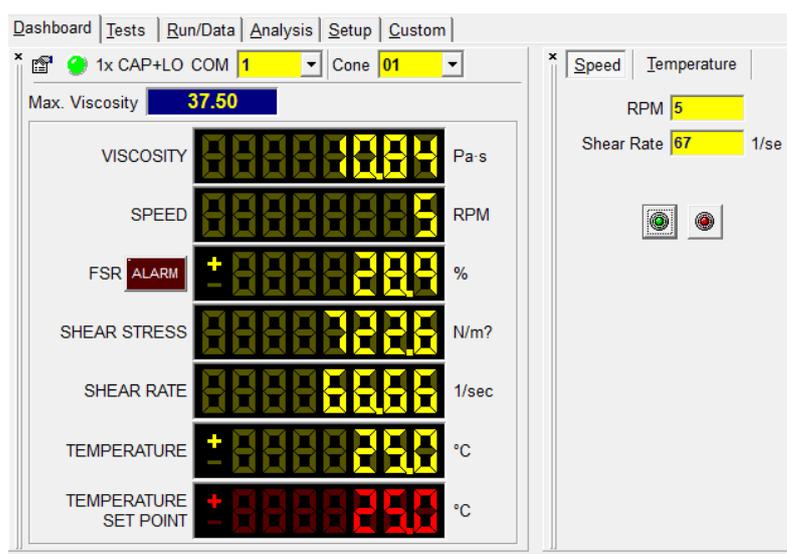


Рис. 2.2. Интерфейс программы Sarcal 32

В качестве объектов исследования, при измерении вязкости, использовали не готовое связующее, а основные его компоненты: эпоксидную смолу марки ЭД-20, отвердитель – триэтаноламинтитанат (ТЭАТ) и активный разбавитель – диэтиленгликоль (ДЭГ). Использование активного разбавителя марки ДЭГ позволяло уменьшать вязкость связующего до значений 0,2-1 Па·с, что было аналогично вязкости эпоксидного связующего марки Araldite LY 8615/XB 5173, которое использовалось при изготовлении рефлектора ЛА.

Варьирование состава связующего позволило расширить ассортимент используемых составов, что привело к повышению достоверности полученных результатов (табл. 2.2).

В результате проведенных исследований установлено, что радиус шпинделя оказывает существенное влияние на скорость сдвига. Например, при числе оборотов, равном 5 об/мин скорость сдвига при использовании шпинделя № 1 составляет 67 1/с, а при использовании шпинделя № 5, ее величина равна 16,66 1/с.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 2.2, были получены при комнатной температуре, значения которой составляли +25°C. Все экспериментальные исследования и последующее изготовление образцов рефлекторов ЛА проводили в научно-образовательном центре МГТУ им. Н.Э. Баумана, в помещениях которого поддерживалась постоянная температура +25°C. Однако в реальных условиях колебания температуры в производственных цехах могут достигать 10°C и даже более и поэтому для связующего состава (ЭД-20 +ТЭАТ + 5 ДЭГ) провели измерения вязкости при повышенных температурах, также при использовании двух различных шпинделей №1 и №5 (табл. 2.3).

Таблица 2.2. – Результаты измерения вязкости при комнатной температуре

Содержание ДЭГ, мас.ч.	Шпindelь №1		Шпindelь №5		Разница в изме- рениях вязкости, Па·с
	γ 1/с	η , Па·с	γ 1/с	η , Па·с	
Без ДЭГ	67	25,08	16,6	19,8	5,28
	133	24,97	33,3	18,9	6,07
	200	24,96	49,9	18,8	6,16
	267	24,95	66,6	18,6	6,35
	333	24,94	83,3	18,54	6,4
	400	24,94	99,9	18,53	6,41
5 ДЭГ	67	8,1	16,6	6	2,1
	133	8,213	33,3	5,7	2,513
	200	8,162	49,9	5,4	2,762
	267	8,119	66,6	5,55	2,569
	333	8,09	83,3	5,76	2,33
	400	8,04	99,9	5,7	2,34
10 ДЭГ	67	3,45	16,6	2,4	1,05
	133	3,394	33,3	2,4	0,994
	200	3,413	49,9	2,2	1,213
	267	3,384	66,6	2,4	0,984
	333	3,420	83,3	2,52	0,9
	400	3,425	99,9	2,5	0,925
15 ДЭГ	67	1,687	16,6	1,2	0,487
	133	1,613	33,3	1,2	0,413
	200	1,587	49,9	0,8	0,787
	267	1,575	66,6	1,05	0,525
	333	1,590	83,3	1,32	0,27
	400	1,594	99,9	1,2	0,394

Таблица 2.3. – Результаты измерения вязкости при повышенных температурах

Температура, °С	25	30	35	40	45	50	55
Вязкость, при использовании шпинделя №1, Па·с	8,06	6,7	3,08	2,1	1,78	1,42	0,83
Вязкость, при использовании шпинделя №5, Па·с	5,97	3,52	2,3	1,4	1,1	0,87	0,42
Разница в измерениях вязкости при использовании шпинделей №1 и № 5, Па·с							
	2,09	3,18	0,78	0,7	0,68	0,55	0,41

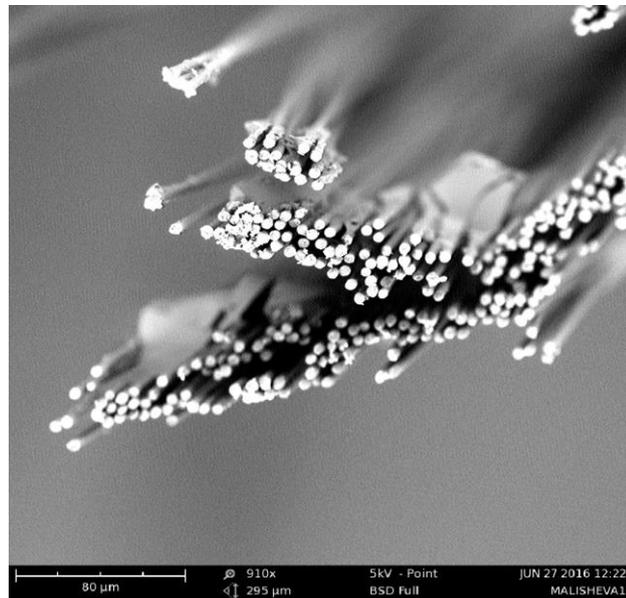
В результате проведенных исследований установлено, что для вязких связующих, у которых значения вязкости составляют 2 Па·с и более, необходимо использовать шпиндель №5 (конусный угол равен 1,8°). Для менее вязких связующих, вязкость которых составляет менее 2 Па·с необходимо применять шпиндель №1 (конусный угол которого составляет 0,45°).

2.2. Исследование структуры углеродных тканей

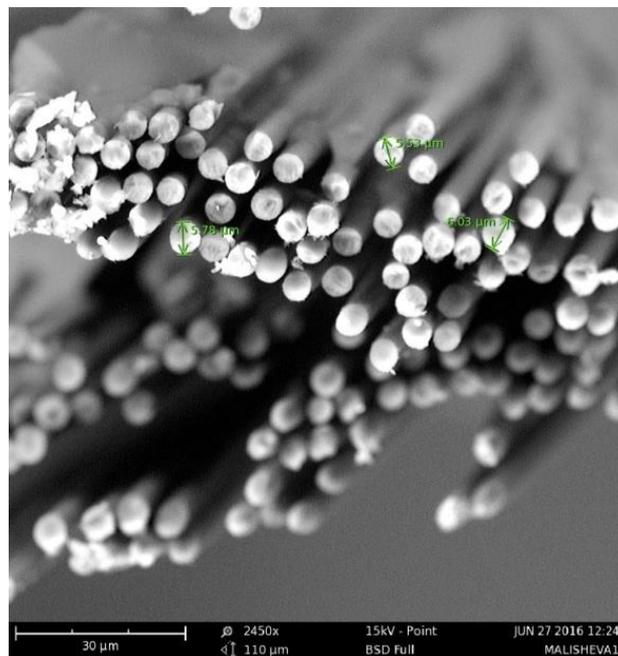
Для изготовления рефлектора, его разработчиками [127] рекомендована углеродная ткань марки Аспро А-60 и А-80, которые производители относят к классу плоских тканых наполнителей. Подробно структура и механические свойства углеродных волокон рассмотрены в работах [38, 138]. Форму диаметра единичного волокна оценивали с помощью электронного микроскопа марки PHENOM PRO X, который широко используется для структурных исследований ПКМ [94, 95].

Для сравнения в работе также использовалась широко распространенная стандартная (т.е. не плоская) углеродная ткань марки HEXCEL. Проведенные исследования показали (рис. 2.3 и рис. 2.4) что оба типа тканей имеют круглый диаметр волокон. Диаметр волокна у ткани марки Аспро А-60

изменяется от 5,53 до 6,03 мкм, а у ткани марки HEXCEL – от 6,33 до 7,79 мкм. Точность оценки диаметра составила 50 нм.

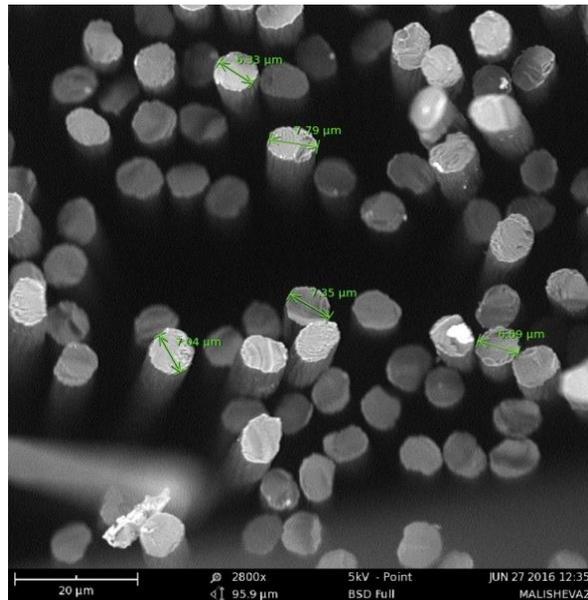


a)

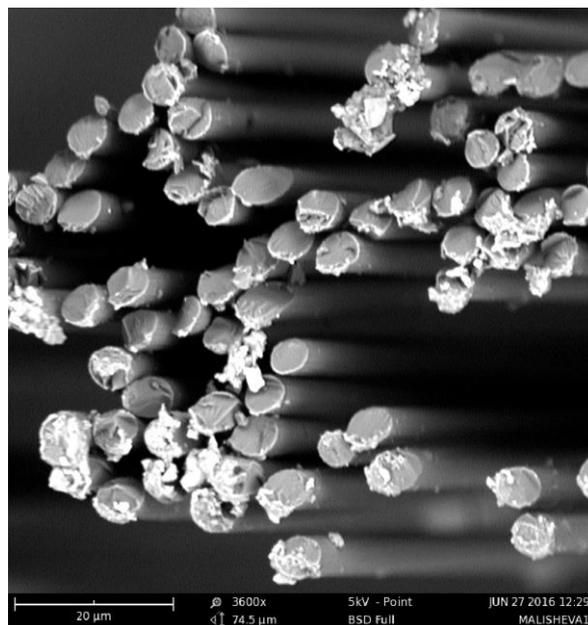


б)

Рис. 2.3. Внешний вид углеродных волокон ткани марки Аспро А-60 при различном увеличении: а) x910; б) x2450



а)



б)

Рис. 2.4. Внешний вид углеродных волокон ткани марки HEXCEL при различном увеличении: а) $\times 2800$; б) $\times 3600$

Из полученных результатов следует, что у углеродной ткани марки Аспро А60 разница диаметров составляет 0,5 мкм, а у ткани марки HEXCEL – 1.46 мкм. Из результатов структурного анализа также следует, что у ткани HEXCEL между отдельными волокнами имеются промежутки, которые раз-

личны между собой по форме и площади, тогда как у ткани марки Аспро А60 таких дефектов не обнаружено.

2.3. Исследование влияния сетевого угла на кинетику процесса пропитывания

Для моделирования процесса пропитывания использовалась программа PAM-RTM. Значения сетевого угла α (угол образован нитями основы и утка ткани) изменяли в диапазоне 30-90° (рис. 2.5). При моделировании также учитывали угол, под которым проводилась подача связующего.

В качестве объектов исследования использовалось эпоксидное связующее Araldite LY 8615/XB 5173 и два типа углеродной ткани HEXCEL и Аспро А60. Моделирование проводилось на однослойном тканном наполнителе размером 500x500мм, давление подачи – 10⁵ МПа.

В табл. 2.4 и на рис. 2.6 приведены расчетные значения времени процесса пропитывания при изменении сетевых углов от 90° до 40° для двух углов 90° и 45°, под которыми подавалось связующее. Первоначально значения коэффициентов проницаемости K углеродных тканей экспериментально не определялись и для расчетов использовались значения этих коэффициентов, взятые из справочника производителей [151,152]: для углеродной ткани марки HEXCEL $K_1 = 7,184 \cdot 10^{-8}$ и $K_2 = 7,184 \cdot 10^{-8}$, Аспро А60 $K_1 = 3,929 \cdot 10^{-8}$ и $K_2 = 3,929 \cdot 10^{-8}$.

В результате проведенных расчетов установлено, что на продолжительность процесса пропитывания большое влияние оказывает угол, под которым связующее проходит по ткани. При фронтальной подаче связующего (рис. 2.5, а), при уменьшении сетевого угла имеет место увеличение продолжительности процесса пропитывания. При подаче связующего под углом 45° (рис. 2.5, е), имеет место противоположная зависимость и при

уменьшении сетевого угла время процесса пропитывания также уменьшается.

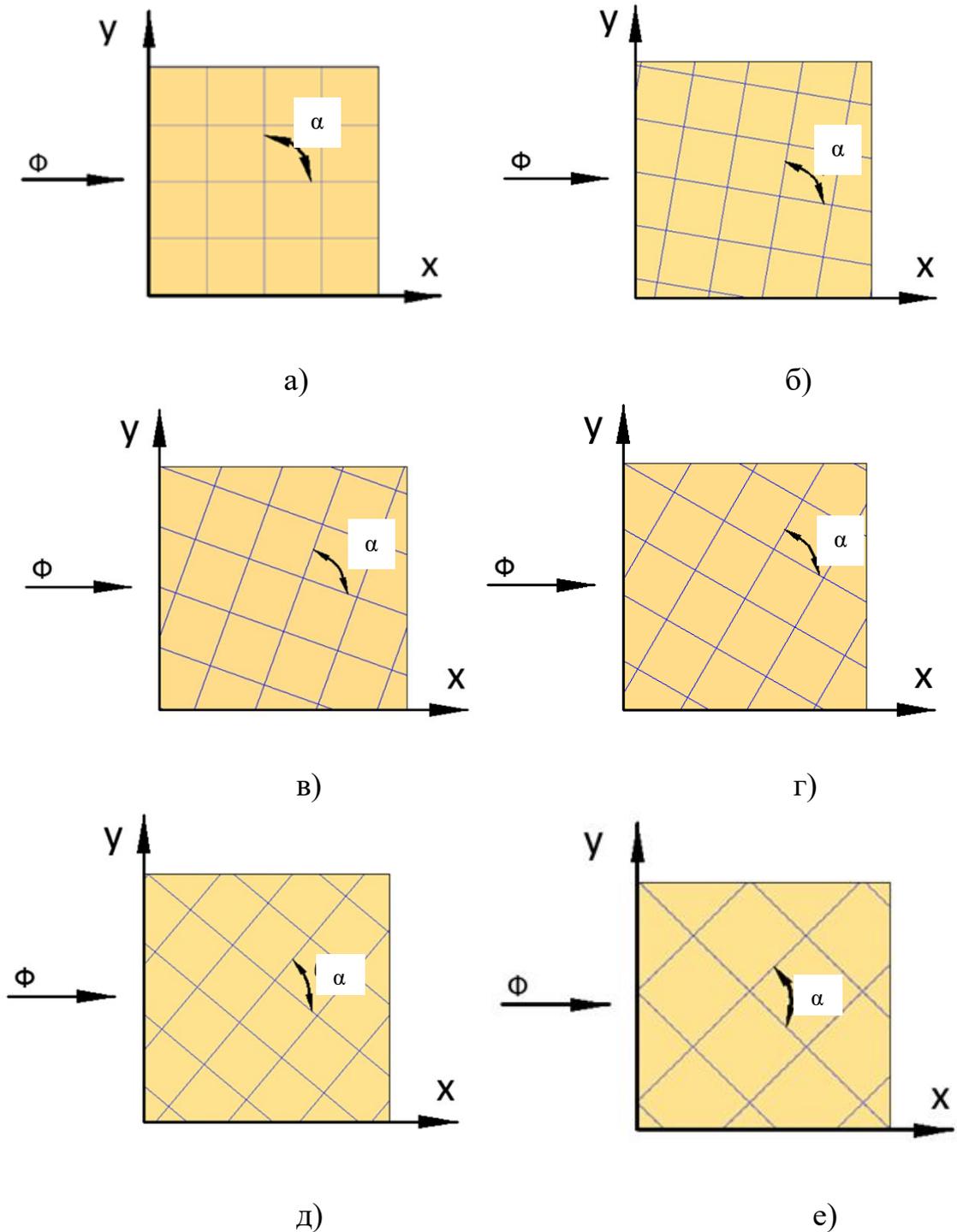


Рис. 2.5. Схема подачи связующего при изменении сетевого угла α :

а) 90° ; б) 80° ; в) 70° ; г) 60° ; д) 50° ; е) 45°

Таблица 2.4. – Значения времени пропитывания (сек) при выкладке на плоскую поверхность оснастки

Сетевой угол, α	Угол подачи связующего, $^{\circ}$	
	90	45
Углеродная ткань Аспро А60		
90	64	77
80	70	66
70	77	58
60	84	52
50	92	48
40	94	45
Углеродная ткань HEXCEL		
90	58	71
80	62	63
70	68	55
60	76	50
50	84	44

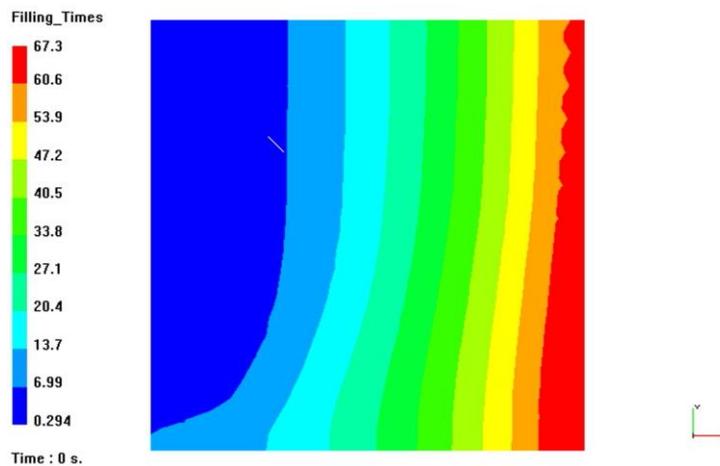


Рис. 2.6. Результаты расчета времени процесса пропитывания при угле подачи связующего 90° и значении сетевого угла $\alpha = 70^{\circ}$, время пропитывания 68 сек.

Для образца из Аспро А-60, наименьшее время (при фронтальной пропитке) составляет 77 сек, а при изменении угла подачи связующего с 90° до 45° продолжительность пропитывания уменьшилась до 45 сек. Время пропитывания углеродной ткани Нехсел меньше, чем Аспро А-60 и при фронтальной пропитке его наименьшее значение составляет 58 сек. Изменение угла подачи связующего приводит к уменьшению времени процесса пропитывания до 44 сек.

2.4. Разработка математической модели элементарной ячейки тканного наполнителя при его выкладке на криволинейную поверхность оснастки

Сечение плоских волокон является квадратным (рис. 2.7, а), тогда как сечение стандартных волокон – круглым (рис. 2.7, б).

Если поверхность оснастки, на которую выкладывается ткань, имеет криволинейную форму, то имеет место изменение сетевых углов внутри каждой ячейки (рис. 2.8).

Пористость ткани Π определяется отношением общего количества пустот в материале к объему ткани. Пористость Π зависит от объема элементарной ячейки V и объемного содержания волокна в элементарной ячейке V_f

$$\Pi = 1 - \frac{V_f}{V} \quad (2.1)$$

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

$$V_{нач} = abh_1 \quad (2.2)$$

где a , b , h_1 – геометрические характеристики элементарной ячейки ткани (см. рис. 2.7).

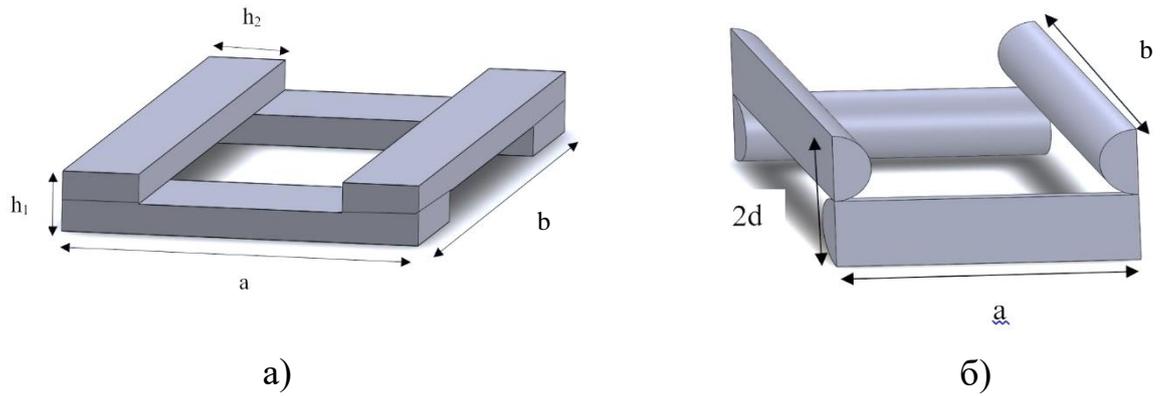


Рис. 2.7. Модель элементарной ячейки структуры плоской (а) и обычной (б) ткани

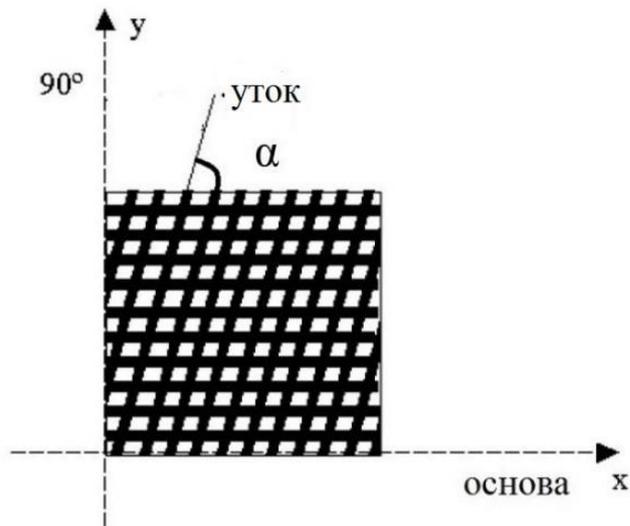


Рис. 2.8. Схемы изменения сетевого угла при выкладке ткани на поверхность двойной кривизны

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

$$V_{def} = abh_1 \sin \alpha \quad (2.3)$$

$$P_{min} = 1 - \frac{\pi}{4 \sin 60} \quad (2.4)$$

Минимальное значение пористости P_{min} , найденное по уравнению (2.4), составляет 0,09. Объем волокна в элементарной ячейке при деформировании не изменяется

$$V_f = V_{f(нач)} = \frac{h_2 h_1}{2} (a + b) (1 - P_{min}) \quad (2.5)$$

По уравнению (2.6) начальная пористость $P_{нач}$ ткани и ее окончательное значение $P_{деф}$ после ее выкладки на криволинейной поверхности (т.е. в деформированном состоянии) равны

$$P_{нач} = \frac{V_{f_{нач}}}{V_{нач}} \quad P_{деф} = \frac{V_{f_{деф}}}{V_{деф}} \quad (2.6)$$

$$\frac{P_{деф}}{P_{нач}} = \frac{ab - \frac{h_2}{2}(a+b)(1 - P_{мин})}{ab - h_2/2(a+b)(1 - P_{мин})} \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha} \quad (2.7)$$

Коэффициент проницаемости меняется при изменении сетевого угла в процессе выкладки ткани на криволинейную поверхность (рис. 2.8). В работе рассмотрены ткани, имеющие симметрическую структуру по основе и утку, поэтому коэффициент проницаемости K_1 (по основе) и K_2 (по утку) равны (рис. 2.9).

Для оценки значения коэффициентов проницаемости использовали модели Kozeny-Carman [101,125].

$$K_{деф} = \left[\frac{ab - \frac{h_2}{2}(a+b)(1 - P_{мин})}{ab - h_2/2(a+b)(1 - P_{мин})} \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha} \right]^3 \sin^2 \alpha K_{нач} \quad (2.8)$$

$$K_{1,2} = K_{деф} \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}} \quad (2.9)$$

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

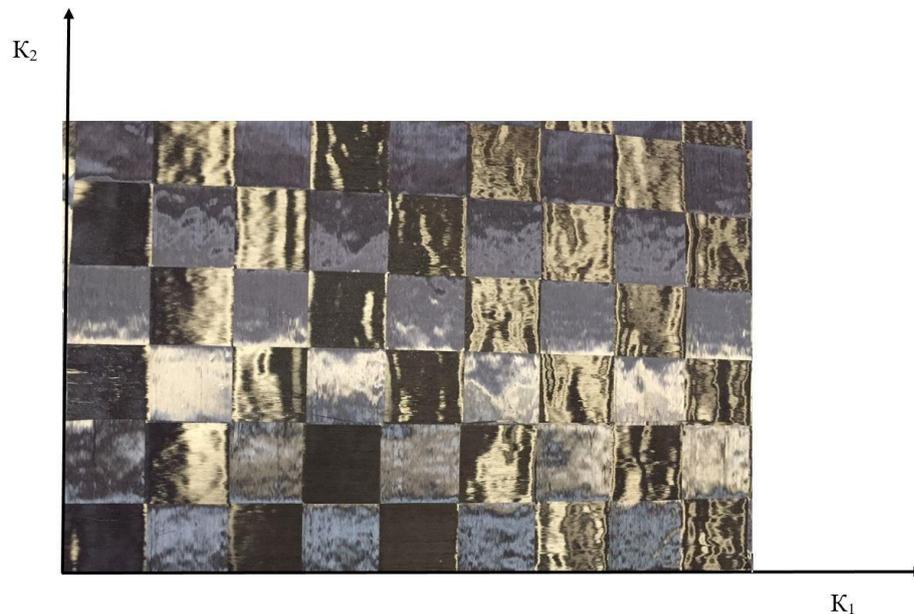


Рис. 2.9. Внешний вид ткани, с равными значениями коэффициентов проницаемости $K_1 = K_2$

Используя уравнение (2.9) определим значения коэффициентов проницаемости тканей (2.7) и построим их зависимость от сетевого угла (рис. 2.10). Для сравнения полученных результатов, наряду с тканью Аспро А-60, которая использовалась при изготовлении рефлектора, также были взяты углеродные ткани марок Аспро А-80 и HEXCEL. Геометрические параметры были рассмотрены, для ткани Аспро А-60, $a=b=54\text{мм}$, $h_1=27\text{мм}$, $h_2=0,1\text{ мм}$ и для Аспро А-80, $a=b=44\text{мм}$, $h_1=22\text{мм}$, $h_2=0,1\text{мм}$ и для ткани Hexcel, $a=b=8\text{мм}$, $d=3,5\text{мм}$.

Проведенные расчеты показали, что для углеродных тканей марок Аспро А-60 и Аспро А-80 при изменении сетевых углов в меньшей степени характерно изменение значений коэффициента проницаемости, чем для углеродной ткани марки HEXCEL. Между собой по этому показателю ткани марок Аспро А-60 и Аспро А-80 отличаются очень незначительно.

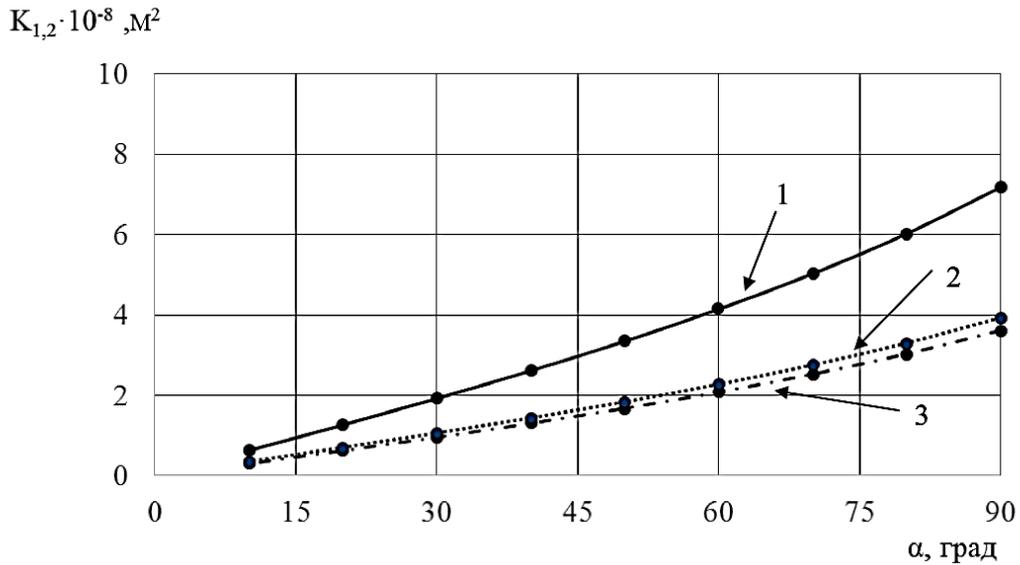


Рис. 2.10. Зависимости коэффициента проницаемости от сетевого угла для углеродных тканей марок: HEXCEL (1), Аспро А-60 (2), Аспро А-80 (3)

В результате проведенных исследований установлено, что значения коэффициентов пропитывания существенно зависят от кривизны оснастки, на которую выкладывается тканый наполнитель, и чем она больше, тем в большей степени изменяются значения сетевых углов.

2.5. Определение коэффициентов проницаемости

Для экспериментального определения значений коэффициента проницаемости первоначально исследовался образец, выложенный на плоскую оснастку 600х60 мм при фронтальной подаче связующего (рис. 2.11). В работе использована методика, изложенная в трудах Endruweit А., Ermanni Р. [106].

Исследованные образцы состояли из четырех слоев ткани с углами выкладки $0/\pm 45/90$.



Рис. 2.11. Фото образцов ткани при определении значений коэффициента проницаемости

Для рассматриваемой элементарной ячейки значения $a=b$ и $h_1=0,3a$ и поэтому значения коэффициентов проницаемости в направлении основы и утка равны. Расчет значений коэффициентов проницаемости (в недеформированном, т.е. начальном состоянии) проводили по формулам (2.10) и (2.11). Полученные результаты представлены в табл.2.5.

$$K_{нач} = \frac{\Pi \mu x^2}{2\Delta p \tau} \quad (2.10)$$

$$\Pi = 1 - \frac{\rho_A n}{\rho h} \quad (2.11)$$

Где $K_{нач}$ – коэффициент проницаемости недеформированной ткани, τ – время пропитывания, Δp – перепад давления, Π – пористость ткани, x – длина образца, μ – вязкость связующего, ρ_A – поверхностная плотность, ρ – плотность материала, h – толщина пакета, n – количество слоев.

Для деталей симметричной формы подача связующего осуществляется в центре. При расчете значений коэффициента проницаемости используем уравнение (2.12), полученное в работах [106,108].

$$K = \frac{\Pi \mu R_{01}^2}{4\Delta p \tau} \left(\left(\frac{R_1}{R_0} \right)^2 \left(2 \ln \left(\frac{R_1}{R_0} \right) - 1 \right) + 1 \right) \quad (2.12)$$

Где K – коэффициент проницаемости; R_0 – радиус трубки по которой подается связующее; R_1 – радиус фронта потока связующего.

Значения коэффициентов проницаемости определяли не только на модельных образцах (см. рис. 2.11), но и на реальном образце рефлектора ЛА. На рис. 2.12 показано фото рефлектора на 120 сек подачи связующего. Полученные значения коэффициентов проницаемости также приведены в табл. 2.5.

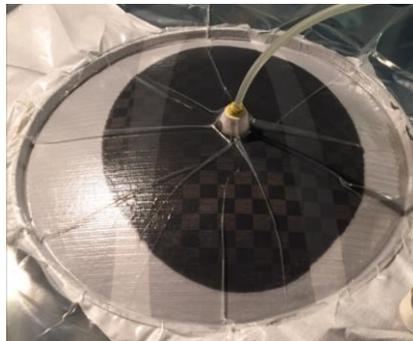


Рис.2.12. Фото рефлектора при определении значений коэффициентов проницаемости

Таблица 2.5. – Значения коэффициентов проницаемости K и пористости Π

Марка углеродных тканей	Π , %	K , (м ²)10 ⁻⁸
HEXCEL	13,3	7,24
Аспро А-60	5	3,9
Аспро А-80	3,8	3,6

В результате проведенных исследований установлено, что значения пористости и коэффициента проницаемости при уменьшении сетевого угла

также снижаются. Значения коэффициентов проницаемости, определенные на плоских образцах и для реальной конструкции рефлектора очень близки.

2.6. Исследование влияния сетевого угла на проницаемость

Формообразующие свойства ткани определяются различными показателями, в том числе и характеристикой драпируемости, которая характеризует способность текстильных материалов в подвешенном состоянии под действием собственного веса принимать пространственную форму и образовывать мягкие, подвижные складки. Драпируемость зависит от жесткости материала на изгиб и его веса: чем выше жесткость, тем хуже драпируемость и чем больше вес, тем драпируемость лучше.

Известно [48], что характеристики драпируемости ткани зависят от сетевого угла, типа плетения, сечения ткани. При выкладке ткани на криволинейной поверхности драпируемость является наиболее важным параметром ткани.

Драпируемость ткани экспериментально определена по уравнению 2.13, полученные значения приведены в табл.2.6, схема измерения показана на рис 2.13.

$$D^{\alpha} = \frac{200 - A^{\alpha}}{200} \cdot 100 \quad (2.13)$$

где A^{α} – максимальная горизонтальная проекция образца на опорную поверхность; D^{α} – коэффициент драпируемости.

Анализ полученных результатов (табл. 2.6) показывает, что ткани марок Аспро А60 и А80 имеют низкую драпируемость, особенно под углами 0 и 90°. При углах ± 45 , значения коэффициентов драпируемости близки к стандартной ткани марки Нехсел. Из полученных результатов следует практическая рекомендация, которая состоит в том, что по криволинейной поверхности оснастки необходимо выкладывать ткань под углом, при котором она имеет максимально высокие значения коэффициента драпируемости.

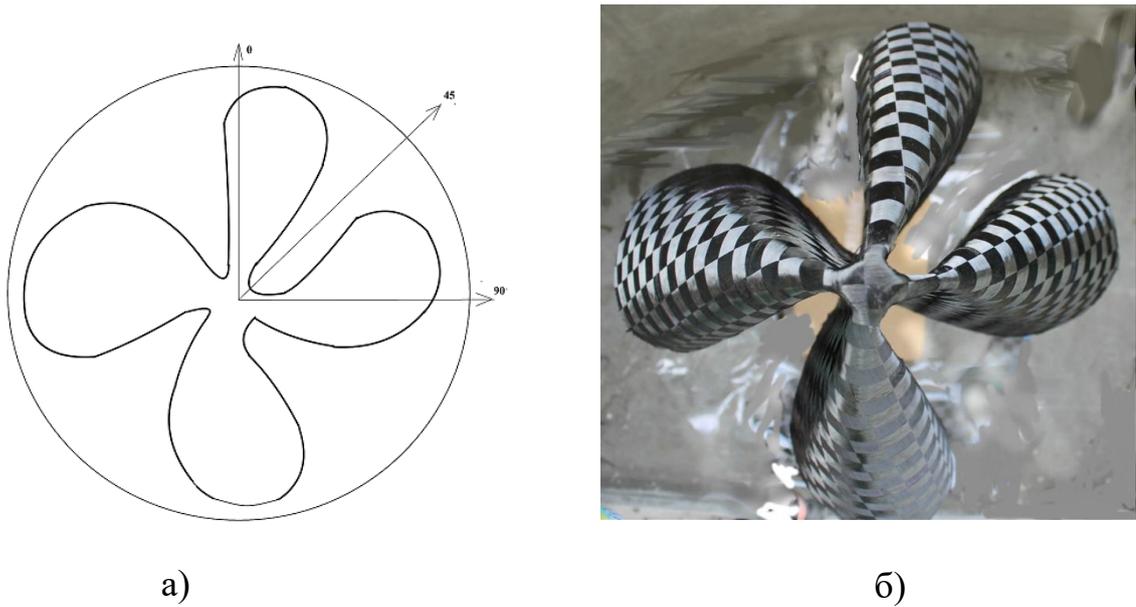


Рис. 2.13. Схема к определению коэффициента драпируемости ткани Аспро А80

Таблица 2.6. – Значения коэффициента драпируемости

Марка ткани	Коэффициент драпируемости в направлении, %			
	0°, %	-45° к нити основы	90°	45°
Hexcel	60	94	70	97
Аспро А 60	40	90	53	95
Аспро А80	30	87	45	94

Для определения изменения сетевого угла при выкладке ткани на криволинейную поверхность оснастки далее в работе была использована кинематическая модель драпировки, которая предполагает, что ткань представлена в виде сетки с вершинами P . При деформации ткани в процессе выкладки будет происходить только сдвиг элементарных ячеек сетки. Выкладывая ткань на криволинейную поверхность оснастки, за начальную точку берут вер-

шину $P_{0,0}$ (рис. 2.14) и далее сетку нумеруют в шахматном порядке по нитям основы $P_{i,0}$ и утка $P_{0,j}$.

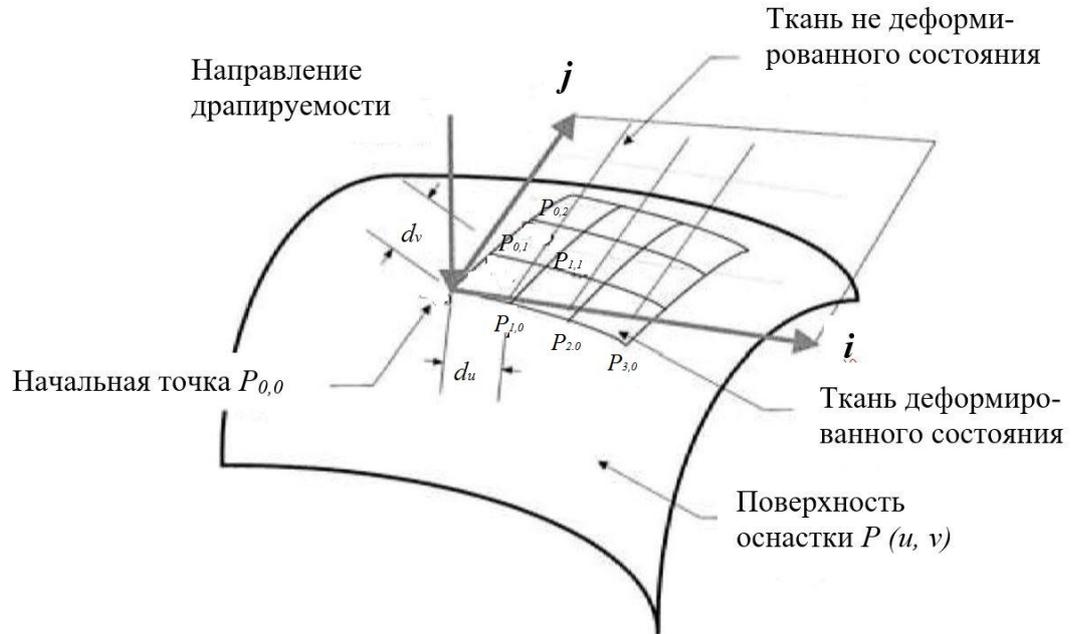


Рис. 2.14. Кинематическая модель драпировки

Координаты точек определяем по формуле

$$P(u, v) = \{x\} = \{x(u, v)\} \quad (2.14)$$

где $P(u, v)$ – определяемая точка на поверхности с координатами (u, v)

Начальные параметры (по основе и утку) определяем по формуле (2.15).

$$d_u = \left[(P_{i-1,0} - P_{i,0}) \cdot (P_{i-1,0} - P_{i,0}) \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

$$d_v = \left[(P_{0,j-1} - P_{0,j}) \cdot (P_{0,j-1} - P_{0,j}) \right]^{1/2}$$

Аналогичным образом определяем остальные координаты точек на поверхности ткани после ее выкладки на оснастку (2.16).

$$d_u = \left[(P_{i-1,j-1} - P_{i,j-1}) \cdot (P_{i-1,j-1} - P_{i,j-1}) \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

$$d_v = \left[(P_{i-1,j-1} - P_{i-1,j}) \cdot (P_{i-1,j-1} - P_{i-1,j}) \right]^{1/2}$$

где d_u, d_v – параметры элементарной ячейки

Используя уравнения (2.15) и (2.16) определяем координаты точек и далее оцениваем сетевой угол. Для сравнения полученных теоретических значений сетевых углов проводили их экспериментальное измерение на оснастке в виде полусферы при использовании хлопчатобумажной ткани (рис. 2.15, а).

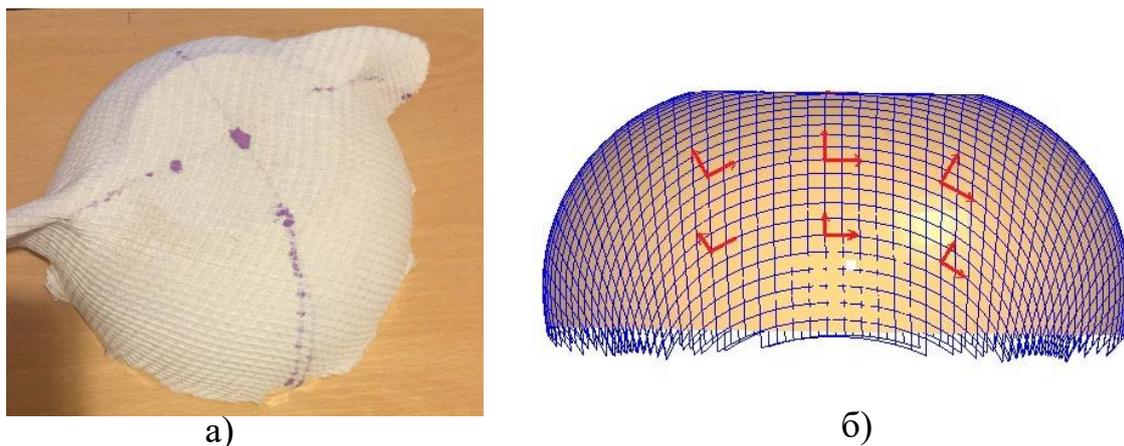


Рис. 2.15. Фото образца (а) и схема обозначений (б) сетевого угла

Схема разметки изготавливалась вручную (см. рис. 2.14). Сравнение результатов экспериментального и теоретического определения сетевых углов показано на рис. 2.16.

При моделировании ткань выкладывается на поверхности по направлению с высоким значением коэффициента драпируемости, который составил ± 45 (см. табл. 2.6).

Оценку влияния кривизны поверхности на продолжительность процесса пропитывания проводили с использованием программы RAM-RTM. Поверхность сферы (см. рис. 2.15, б) была разбита на 2928 треугольных конечных элементов. Результаты моделирования показаны на рис. 2.17 - 2.19 и в табл. 2.7, 2.8.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что при выкладке тканей на поверхность оснастки в виде полусферы, значения сетевого угла изменяются от 90° до 47° . При

уменьшении сетевого угла значения коэффициента проницаемости также уменьшаются, что приводит к увеличению времени пропитывания.

Далее в работе проводилось моделирование круглого образца (рис. 2.20), который имел симметрическую форму и поэтому канал подачи связующего располагаем в центре. Радиус подающей трубки обозначаем R_0 , радиус фронта потока обозначаем R_1 (рис. 2.20).

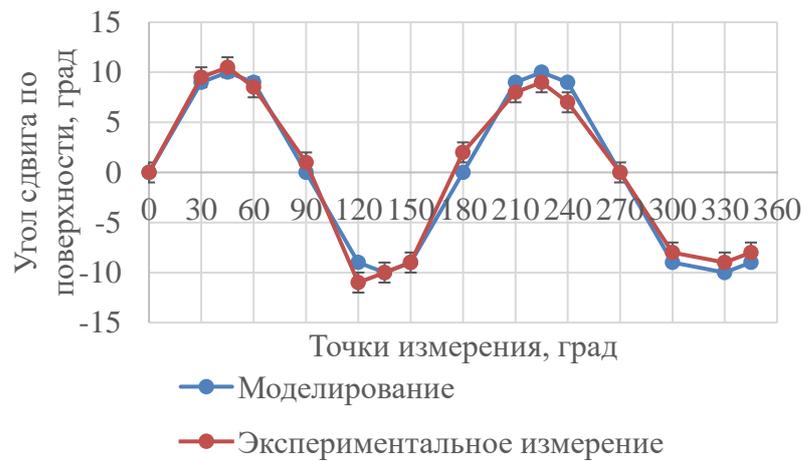


Рис. 2.16. Изменение сетевого угла по поверхности полусферы

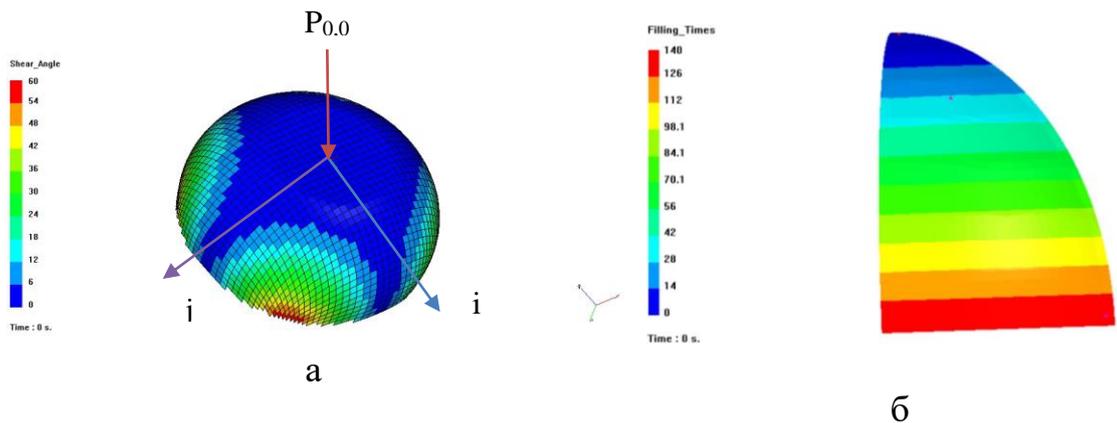


Рис. 2.17. Результаты моделирования параметров процесса пропитывания:
а) сетевого угла; б) времени пропитывания

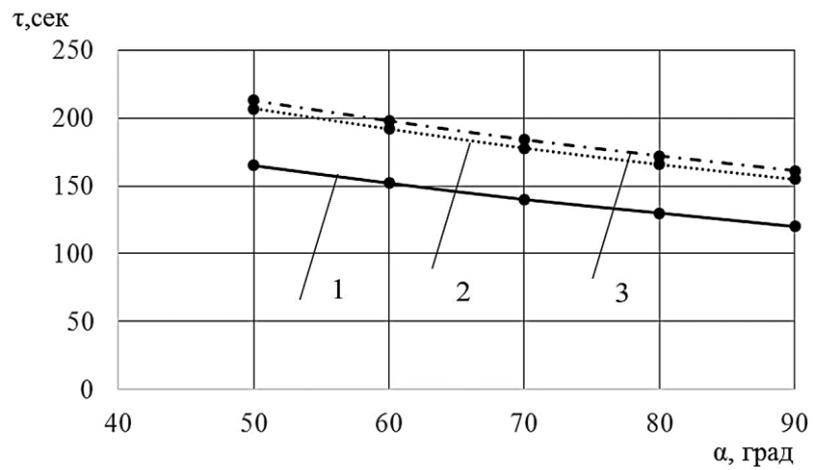


Рис. 2.18. Зависимости времени пропитывания от сетевого угла для углеродных тканей марок: HEXCEL (1), Аспро А-60 (2), Аспро А-80 (3)

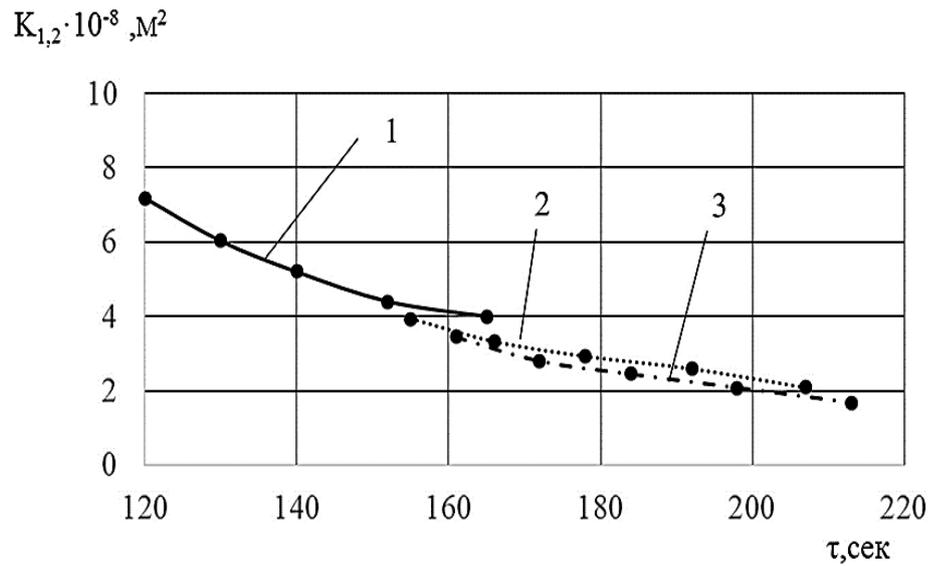


Рис. 2.19. Зависимости времени пропитывания от коэффициента проницаемости угла для углеродных тканей марок: HEXCEL (1), Аспро А-60 (2), Аспро А-80 (3)

Таблица 2.7. – Значения времени пропитывания углеродных тканей в зависимости от сетевого угла

Сетевой угол, α °	Время пропитывания, τ (с) для углеродных тканей марок		
	Аспро А-80	Аспро А-60	Нехсел
90	161	155	120
80	172	166	130
70	184	180	140
60	198	192	152
50	213	207	165

Таблица 2.8. – Зависимости времени пропитывания от коэффициента проницаемости углеродных тканей

Углеродные ткани марок					
Аспро А-80		Аспро А-60		Нехсел	
$K_{1,2} \cdot 10^{-8}$ (м ²)	τ (с)	$K_{1,2} \cdot 10^{-8}$ (м ²)	τ (с)	$K_{1,2} \cdot 10^{-8}$ (м ²)	τ (с)
3,607	161	3,929	155	7,184	120
3,027	172	3,297	166	6,028	130
2,526	184	2,751	180	5,03	140
2,083	198	2,268	192	4,148	152
1,682	213	1,832	207	3,35	165

Сравнение исследуемых углеродных тканей показало, что ткань марки Нехсел пропитывается быстрее (время пропитывания 180 сек), чем ткани марок Аспро А-60 и Аспро А-80 (время пропитывания (219 сек)). Погрешность между теоретическими и экспериментальными значениями не превышала 3%.

Результаты моделирования приведены на рис. 2.21 и в табл. 2.9.

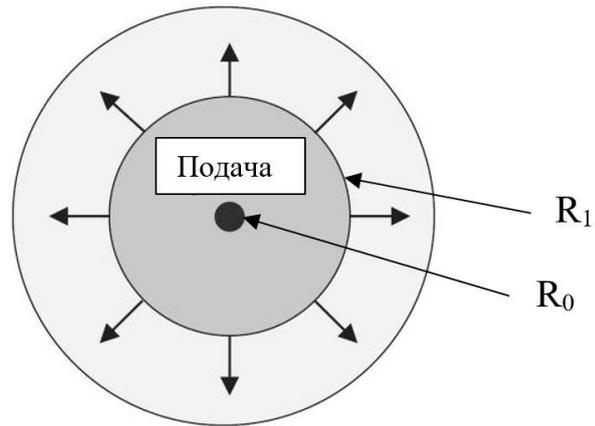


Рис. 2.20. Схема радиального потока связующего

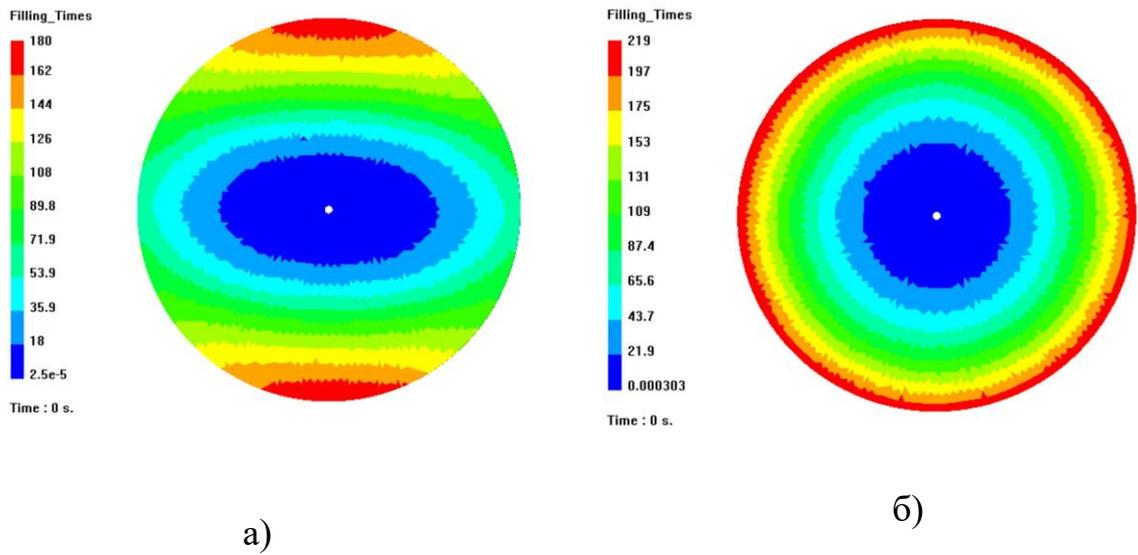


Рис. 2.21. Результаты моделирования времени процесса пропитывания образца: а) криволинейной поверхности; б) плоской поверхности

Таблица 2.9. – Значения времени пропитывания

Углеродные ткани	Время пропитывания, сек		Погрешность, %
	Моделирование	Эксперимент	
Hexcel	180	187	1,5
Аспро А-60	219	223	2
Аспро А-80	240	246	3

Полученные значения сетевых углов и времени процесса пропитывания были использованы далее при разработке технологических режимов пропитывания. Для рассматриваемого изделия – рефлектор, они составили:

- при вязкости связующего 0,3 Па·с и его радиальной подачи (из центра) время пропитывания обычной ткани составляет 180 сек;
- при вязкости связующего 0,3 Па·с и его радиальной подачи (из центра) время пропитывания плоченной ткани составляет 219 сек;
- значения сетевого угла при выкладке обычной ткани на поверхность оснастки изменяется от 90° в центре до 55° по краям;
- значения сетевого угла при выкладке плоченной ткани на поверхность оснастки изменяется от 90° в центре до 47° по краям.

2.7. Выводы по 2 главе

1. Исследованы структуры углеродных тканей, выбранных по результатам литературного обзора в качестве армирующего материала при изготовлении рефлектора ЛА. Установлены средние значения диаметров элементарных волокон, которые составили для тканей марок Аспро А-60–5,7 мкм (разброс диаметров от 5,53 до 6,03 мкм), а для ткани марки HEXCEL – 7,4 мкм (разброс диаметров от 6,33 до 7,79 мкм). Из результатов структур-

ного анализа также следует, что у ткани HEXCEL между отдельными волокнами имеются промежутки, которые различны между собой по форме и площади, тогда как у ткани марки Аспро А-60 таких дефектов не обнаружено.

2. Исследовано влияния сетевого угла на процесс пропитывания и установлено, что при уменьшении сетевого угла имеет место увеличение продолжительности процесса пропитывания. При подаче связующего под углом 45° , имеет место противоположная зависимость, т.е. при уменьшении сетевого угла время процесса пропитывания уменьшается.

3. Разработана методика для определения проницаемости и проведено сравнение значений проницаемости для плоских и круглых образцов. Установлено, что значения коэффициентов проницаемости для ткани HEXCEL составляют $7,24 \cdot 10^{-8}$, а для тканей марок Аспро А-60 и Аспро А-80 – $(3,6 - 3,9) \cdot 10^{-8}$.

4. Исследована кинетика процесса пропитывания в зависимости от структуры ткани, значений сетевого угла и значений угла под которым производится подача связующего. Установлено, что ткань марки HEXCEL пропитывается быстрее, чем ткань марки Аспро А-60. Определены значения времени пропитывания, которые для используемой модели составили 180 сек (ткань марки HEXCEL) и 219 сек (ткань марки Аспро А-60). Погрешность между экспериментальными и теоретическими результатами не превысила 3%.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ВЫКЛАДКИ

В данной главе приведены результаты экспериментальных исследований при отработке технологии изготовления рефлектора ЛА и [67 - 69].

3.1. Исследование влияния пористости на формообразующие свойства тканей

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 анализа структуры тканей использована программа WiseTex, которая позволила определить пористость. Геометрические параметры ячейки определяли экспериментально и далее эти данные использовались в качестве исходных при моделировании. Схемы структуры тканей показаны на рис. 3.1 и 3.2. Интерфейс используемого программного продукта приведен на рис. 3.3 и 3.4.

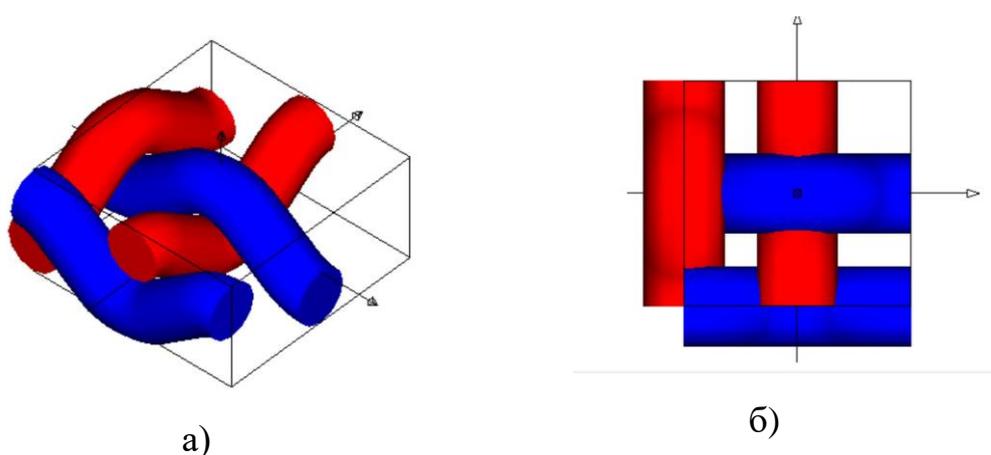


Рис. 3.1. Схема к определению пористости стандартной ткани для 3D (а) и 2D (б) структуры

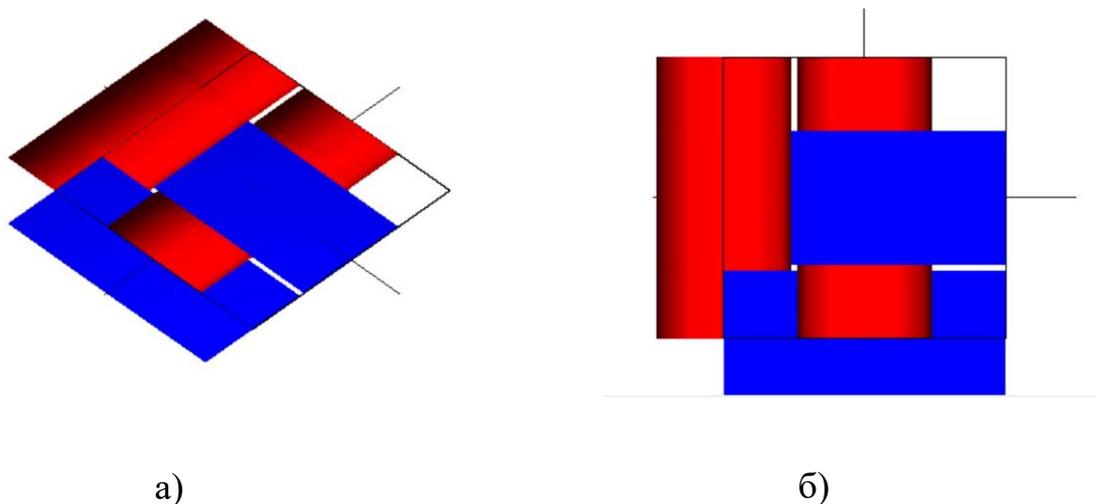


Рис. 3.2. Схема к определению пористости плоской ткани для 3D (а) и 2D (б) структуры

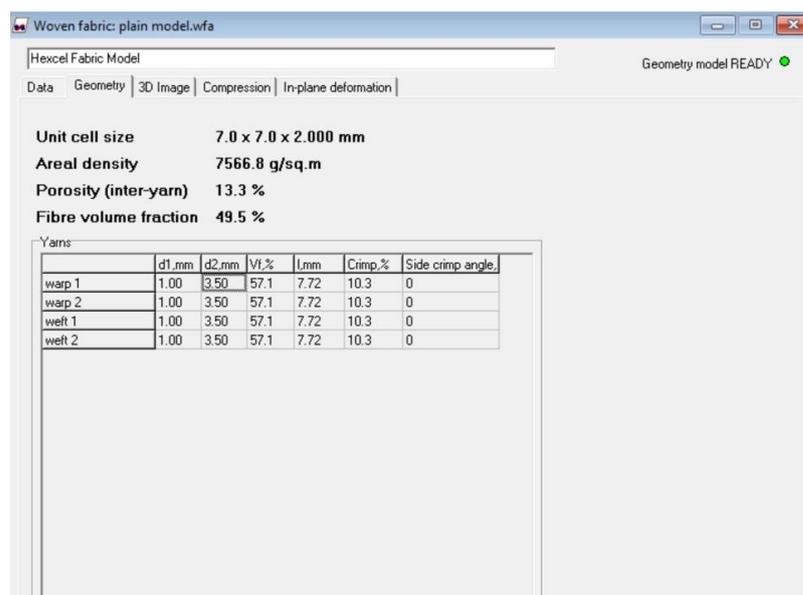


Рис. 3.3. Интерфейс программы WiseTex при расчете пористости ткани Hexcel

В результате проведенных расчетов установлено, что пористость углеродной ткани Аспро А-80 очень низкая и составляет 3,8% (рис.3.4), тогда как пористость ткани Hexcel существенно выше и составляет 13,3% (рис.3.3).

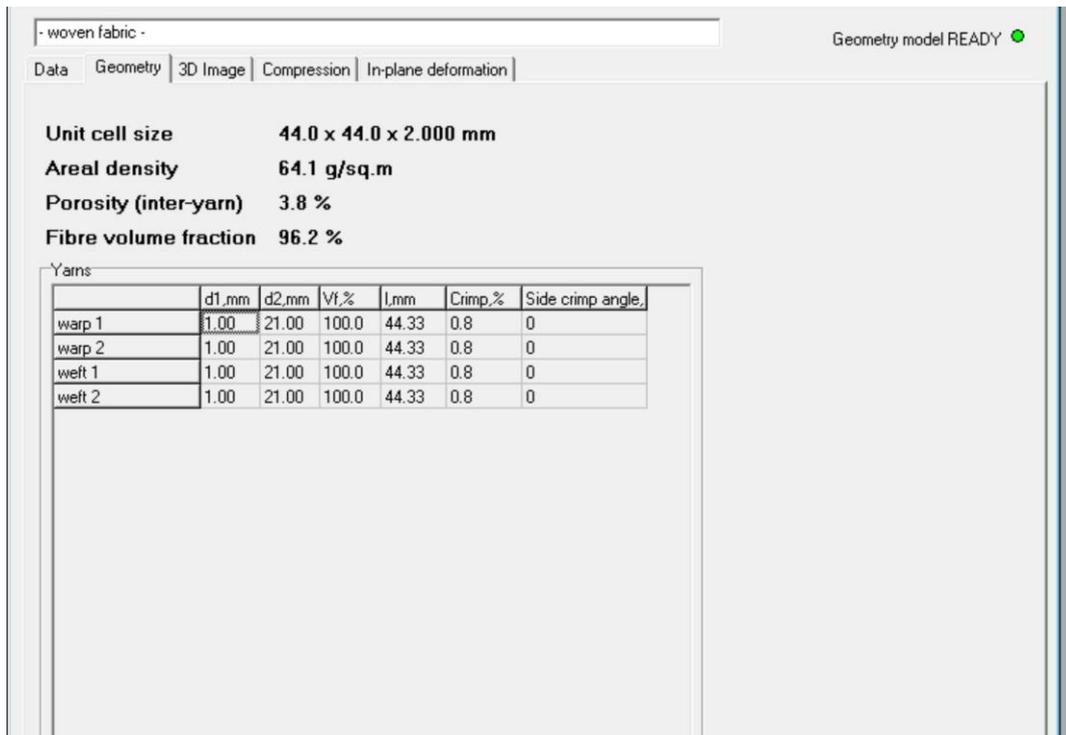


Рис. 3.4. Интерфейс программы WiseTex при расчете пористости ткани Аспро-80

Полученные результаты были использованы для построения зависимостей коэффициента драпируемости от пористости ткани Нехсел, Аспро А-60 и А-80 (рис. 3.5).

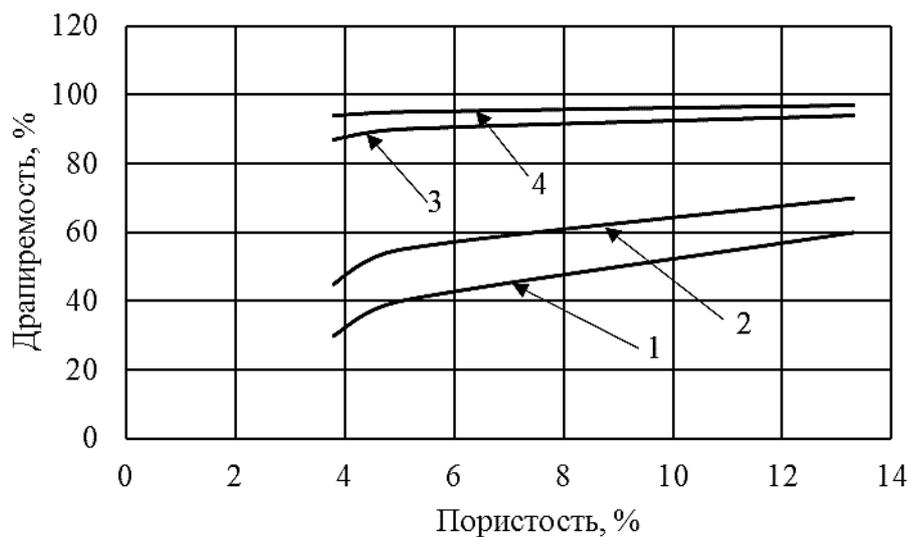


Рис. 3.5. Зависимости драпируемости ткани от пористости при различных схемах выкладки: 1) 0°; 2) 90°; 3) -45°; 4) +45°

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что драпируемость ткани улучшается с увеличением пористости.

Моделирование драпируемости (для рефлектора зеркальной ЛА с заданными габаритами) было проведено в программе PAM-RTM. Оценивалась длина выкройки ткани, при которой не происходило образование складок в зависимости от ее пористости (рис. 3.6).

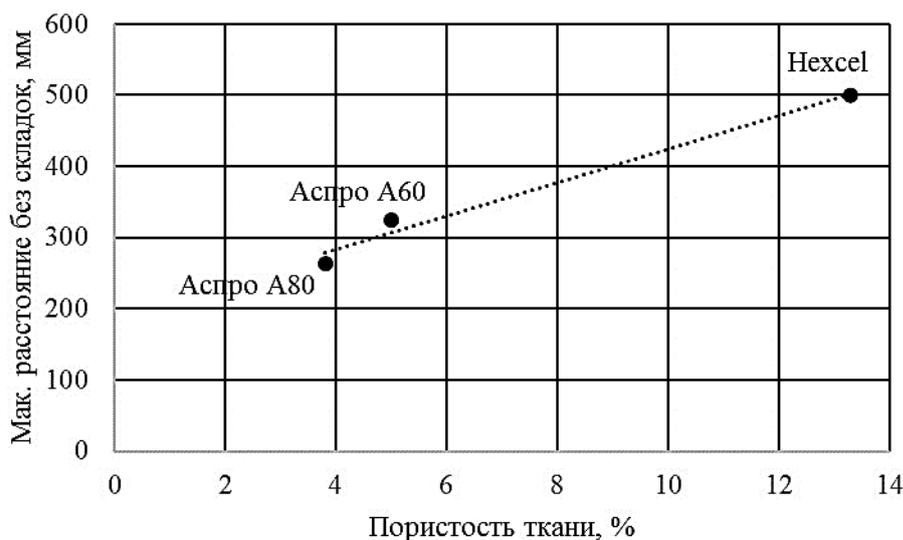


Рис. 3.6. Зависимости габаритов выкройки при которой не происходило образование складок от пористости ткани

Установлено, что при выкладке ткани на поверхности рефлектора максимальный размер выкройки, при котором не происходит образование складок, составляет 500мм для ткани Нехсел, 324 мм для Аспро А-60 и 264 мм для Аспро А-80. В работе сделано предположение, что плохая драпируемость связана с очень низкой пористостью, и для исключения образования складок при выкладке ткани на поверхность оснастки двойной кривизны, необходимо использовать материалы с большими значениями пористости.

3.2. Определение рациональной схемы выкладки

Для определения рациональной схемы выкладки углеродной ткани марки Аспро А-80, первоначально были проведены экспериментальные исследования на аналогичном образце, изготовленном из полосок бумаги (рис. 3.7), структура которой была полностью аналогична ткани Аспро А-80. В работе было рассмотрено два варианта расположения начальной точки:

1) центр образца совпадает с центром рефлектора (рис.3.7), этот вариант выкладки далее назван в работе схема №1;

2) угол образца совпадает с центром рефлектора (рис.3.8), этот вариант выкладки далее назван в работе схема №2.

Критической, будем считать такую точку на поверхности рефлектора, в которой начинается изменение плетения ткани, т.е. происходит образование складки.

При использовании схемы №1, ткань с трех сторон фиксировалась на поверхности оснастки с помощью технологического клея таким образом, что критическая точка находилась на расстоянии 264 мм от фиксированной стороны (рис.3.9, а). Такая схема соответствовала 12 ячейкам ткани. В процессе выкладки было установлено, что в зависимости от степени удаленности от критической точки, имеет место различное образование складки (рис.3.9, б, в).

Для каждой из рассматриваемых схем выкладки было изготовлено по 5 образцов. В результате проведенных исследований установлено, что расстояние между двумя ячейками уменьшается по мере удаленности от критической точки. На расстоянии 200мм от критической точки, отрезок между двумя ячейками ткани составляет 30мм. На расстоянии 100 мм – 38 мм. При выкладке ткани по схеме №1 (центр образца совпадает с центром рефлектора) расстояние между ячейками по центральной линии уменьшается от 44 мм до 30мм.



Рис. 3.7. Определение места расположения критической точки на поверхности рефлектора при выкладке ткани (схема № 1)

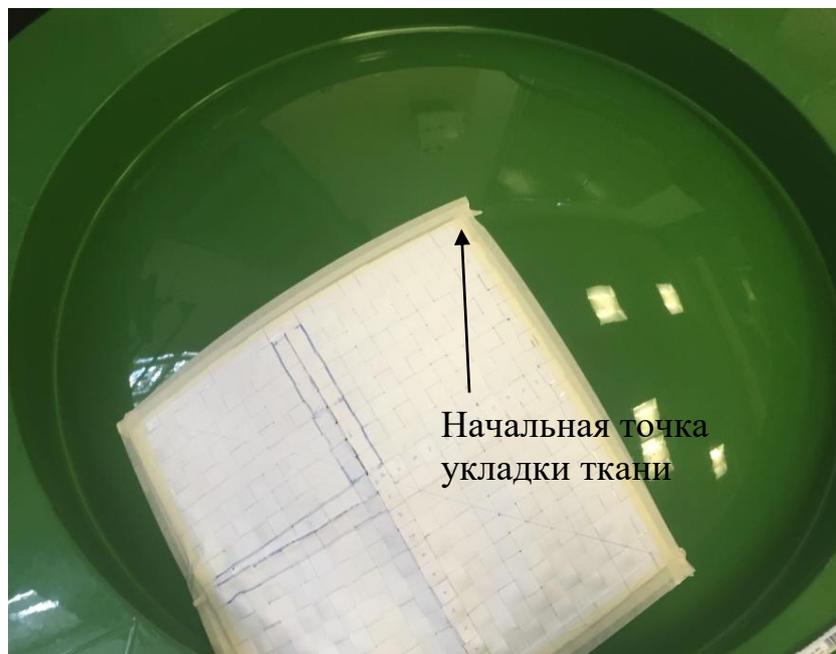
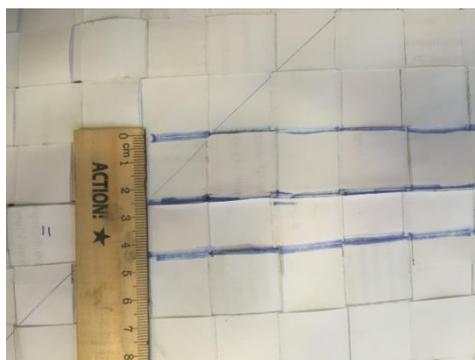


Рис. 3.8. Определение места расположения критической точки на поверхности рефлектора при выкладке ткани (схема № 2)



(a)

(б)



(в)

Рис. 3.9. Фото образцов модельной ткани при измерении расстояния между ячейками на различном удалении от критической точки (схема № 1):
200 мм (а); 100 мм (б); в критической точке (в)

Аналогичные измерения проводились для второго рассматриваемого варианта, при котором угол образца ткани совпадает с центром рефлектора (рис.3.8). Ткань выкладывалась от центра рефлектора и фиксировалась по сторонам на длине 600мм. Установлено, что образование складки также начинается с 12 ячейки (рис. 3.10). Расстояние между ячейки в зоне складки уменьшается от 44мм до 34мм.

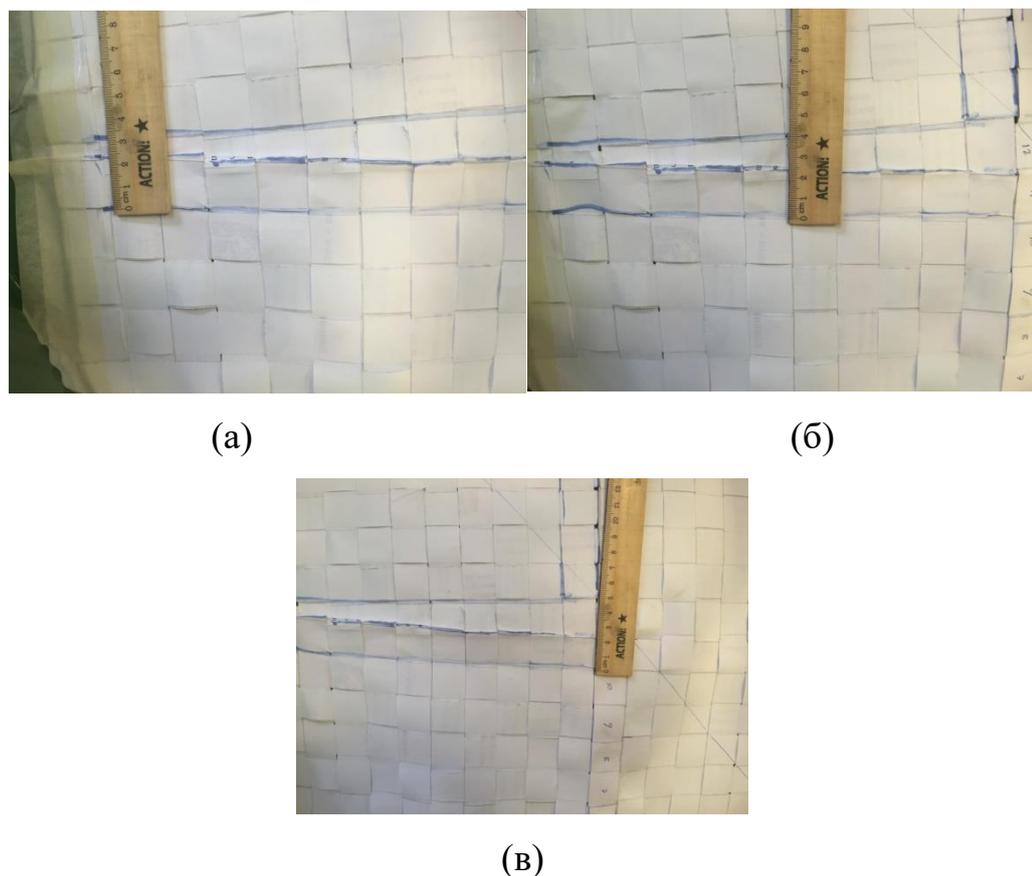


Рис. 3.10. Фото образцов модельной ткани при измерении расстояния между ячейками на различном удалении от критической точки (схема №2):
200 мм (а); 88 мм (б); в критической точке (в)

В результате проведенных исследований установлено, что использование схемы выкладки №2 является более предпочтительным, чем использование схемы №1. Таким образом, в дальнейшей работе использована только схема №2.

3.3. Исследование влияния схемы выкладки на качество и продолжительность технологического процесса

Для определения наиболее рациональной схемы выкладки углеродной ткани Аспро А-80 на поверхности оснастки, в работе были последовательно рассмотрены три варианта (рис. 3.11, 3.13 и 3.15), которые так и названы, вариант 1, вариант 2 и вариант 3:

1) Вариант 1 – ткань выкладывается на поверхность оснастки единым куском (размер ткани составил 600мм×600мм);

2) Вариант 2 – ткань выкладывается тремя кусками (каждая часть представляет собой квадрат, размером 600мм×200мм);

3) Вариант 3 – ткань выкладывается четырьмя кусками (каждая часть представляет собой квадрат, размером 150мм×150мм).

Для каждого из трех рассмотренных вариантов, на рис. 3.12, 3.14 и 3.16 показаны фото наиболее дефектных участков поверхности рефлектора и сделана визуальная оценка наличия (отсутствия) складок (табл. 3.1).

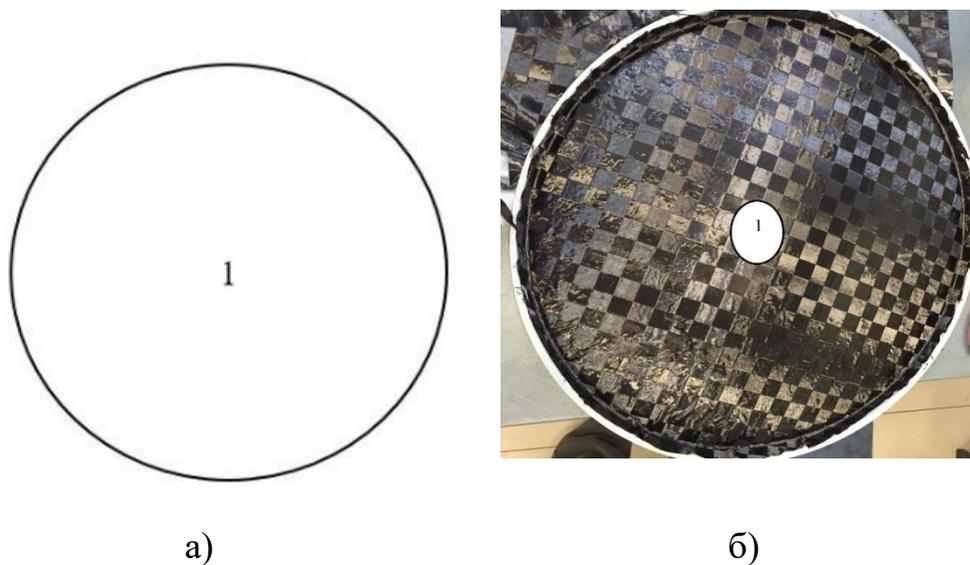
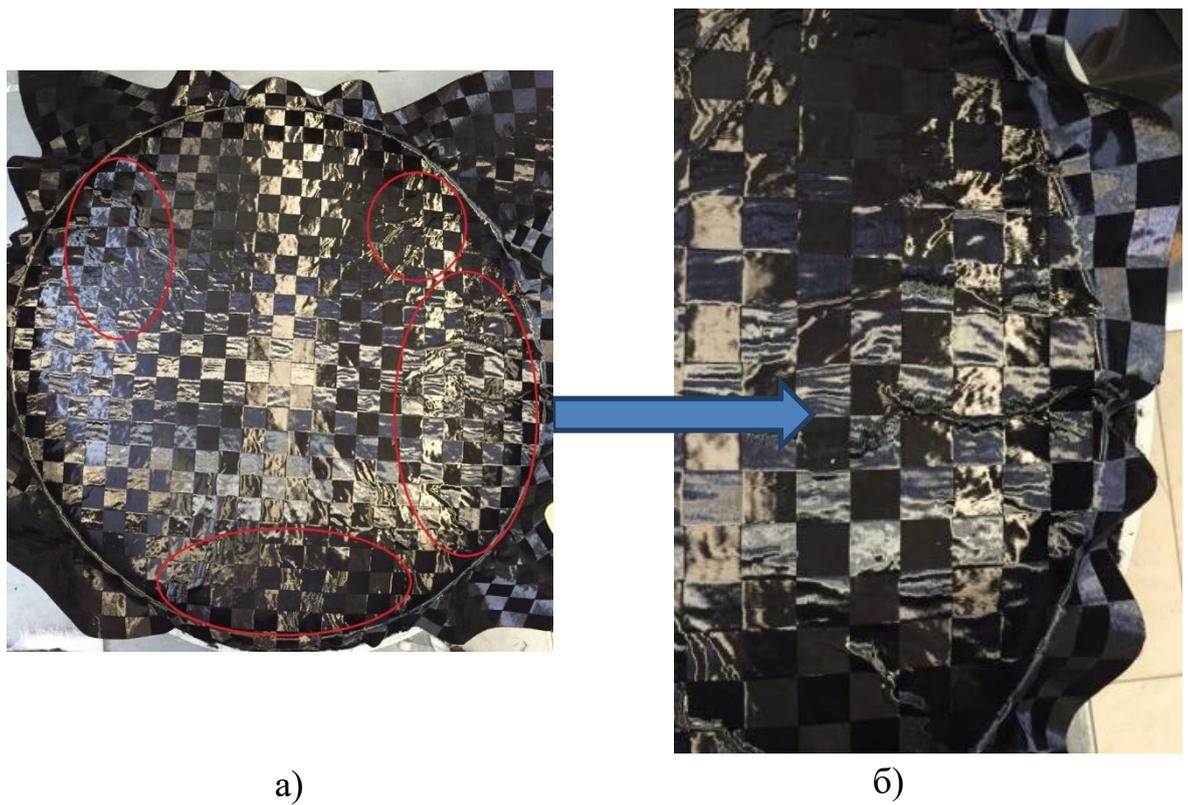


Рис. 3.11. Выкладка ткани на поверхность оснастки (вариант 1):

а – схема выкладки; б – фото образца рефлектора

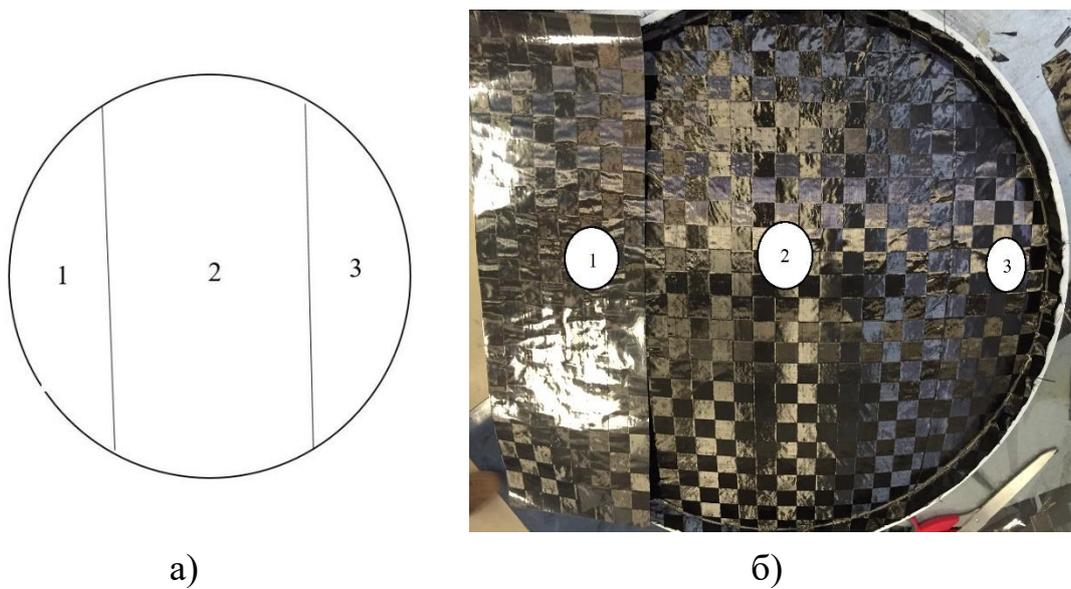


а)

б)

Рис. 3.12. Фото поверхности рефлектора (вариант 1):

а – общий вид; б – места образования складок



а)

б)

Рис. 3.13. Выкладка ткани на поверхность оснастки (вариант 2):

а – схема выкладки; б – фото образца рефлектора

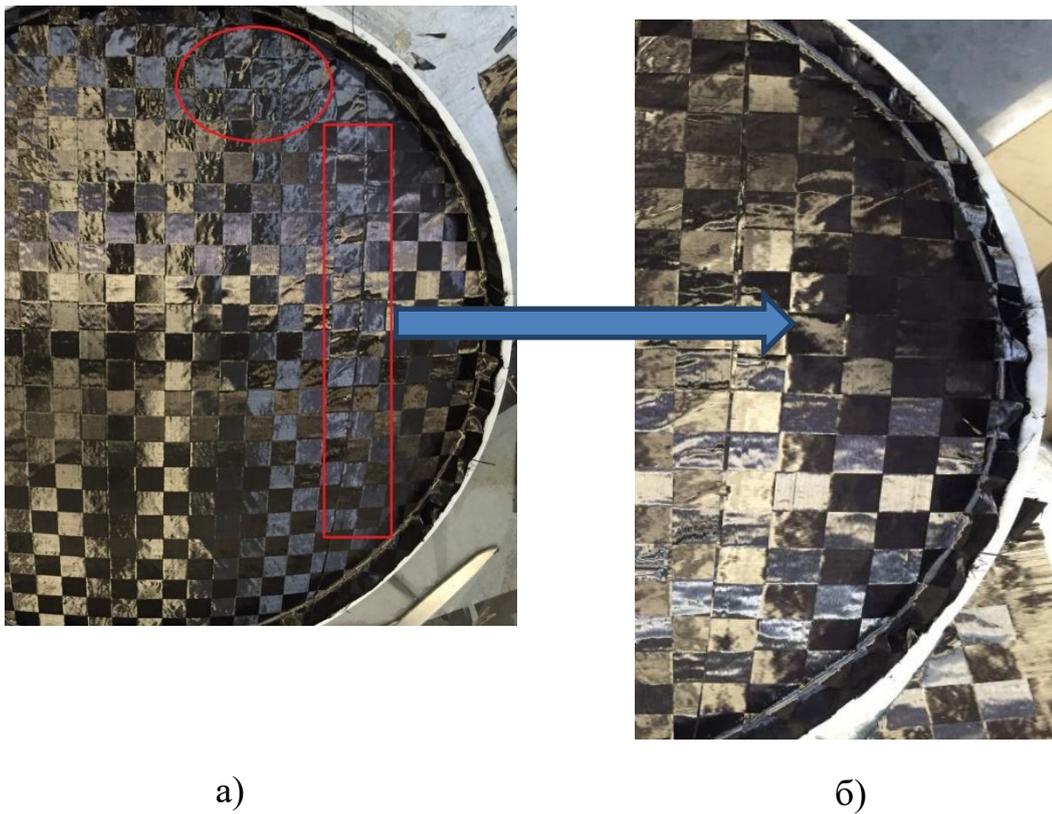


Рис. 3.14. Фото поверхности рефлектора (вариант 2):

а – общий вид; б – зона стыка

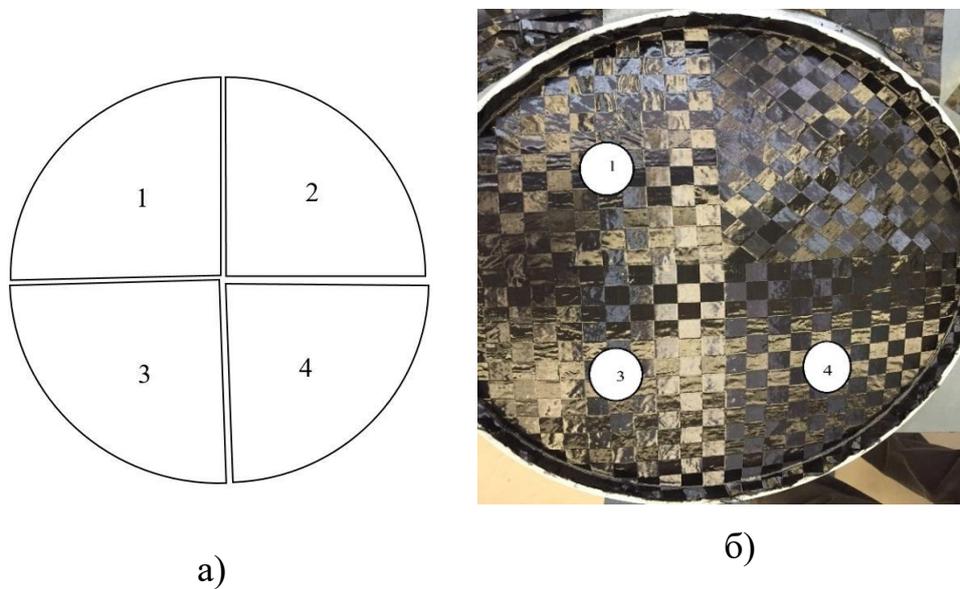


Рис. 3.15. Выкладка ткани на поверхность оснастки (вариант 3):

а – схема выкладки; б – фото образца рефлектора

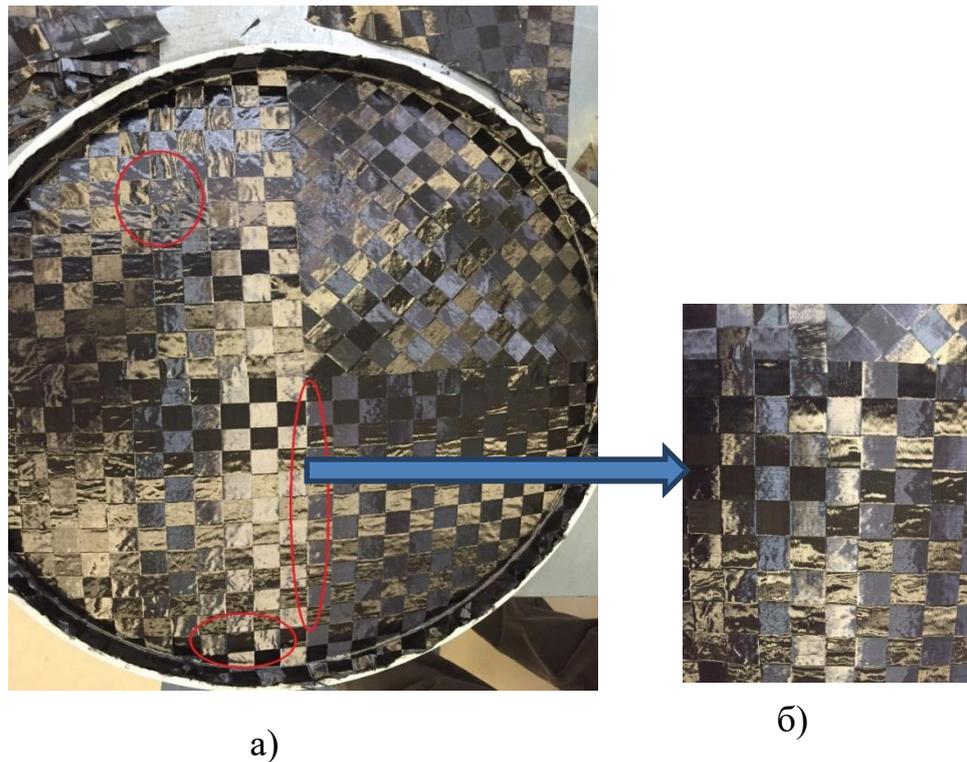


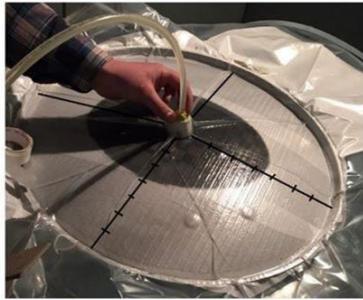
Рис. 3.16. Фото поверхности рефлектора (вариант 3):

а – общий вид; б – зона стыка

Таблица 3.1. – Сравнительная оценка использованных схем выкладки

№ варианта схемы выкладки	Формообразующая способность	Складки
1	плохая	есть
2	плохая	нет
3	хорошая	нет

Для всех трех рассмотренных вариантов выкладки были изготовлены опытные образцы рефлекторов и определено время, затраченное на пропитывание. Для избежания ухудшения прочности конструкции слои ткани выкладываются по направлениям $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]$ и количество слоев является 6. Полученные результаты показаны на рис. 3.17 и в табл. 3.2.



а) Фото на 70 с пропитывания



б) Фото на 70 с пропитывания



в) Фото на 158 с пропитывания



г) Фото на 158 с пропитывания

Рис. 3.17. Фото рефлектора в процессе пропитывания:

(а, в) вариант-1, (б, г) вариант-3

Таблица 3.2. – Время пропитывания при использовании различных схем выкладки

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

В результате проведенных исследований установлено, что при использовании третьей схемы выкладки (см. рис. 3.15) имеет место наилучшее качество выкладки, что характеризуется наименьшим количеством складок. Время полного пропитывания для данной схемы является наименьшим.

3.4. Разработка технологической операции выкладки

Для изготовления полномасштабной модели рефлектора диаметром 1200мм использовалась специальная оснастка, внешний вид которой показан на рис. 3.18. Выкройка углеродной ткани проводилась по ранее выбранной схеме, см. рис. 3.15 (вариант 3). Выкладка, предварительно выкроенных отрезков углеродной ткани, проводилась по ранее выбранной схеме, см. рис. 3.8 (схема №2).

Выбор основных материалов (углеродной ткани и связующего) в работе не проводился, и были использованы результаты, представленные в работе [77]. В качестве вспомогательных материалов были использованы: вакуумная трубка, диаметром 10 мм; спиральная трубка, диаметр которой также составил 10 мм; жертвенная ткань марки Полиплан-120; распределительная сетка марки ПРО-СЕТ-200; вакуумная пленка марки ВАКПЛЕН-ВТ.

Технология изготовления рефлектора включала в себя следующие технологические операции:

- 1) подготовка оснастки (рис.3.18);
- 2) раскрой и выкладка углеродной ткани (рис.3.19) по выбранной схеме (вариант 3);
- 3) раскрой и выкладка жертвенного слоя (рис. 3.20);
- 4) подготовка к процессу инфузии;
- 5) проверка герметичности вакуумного пакета (рис. 3.21);
- 6) приготовление связующего;
- 7) проведение процесса пропитывания (рис.3.22);
- 8) визуальный осмотр готового рефлектора (рис. 3.23).

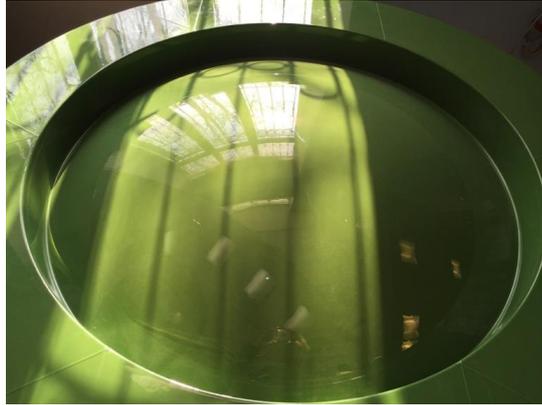


Рис. 3.18. Подготовка оснастки

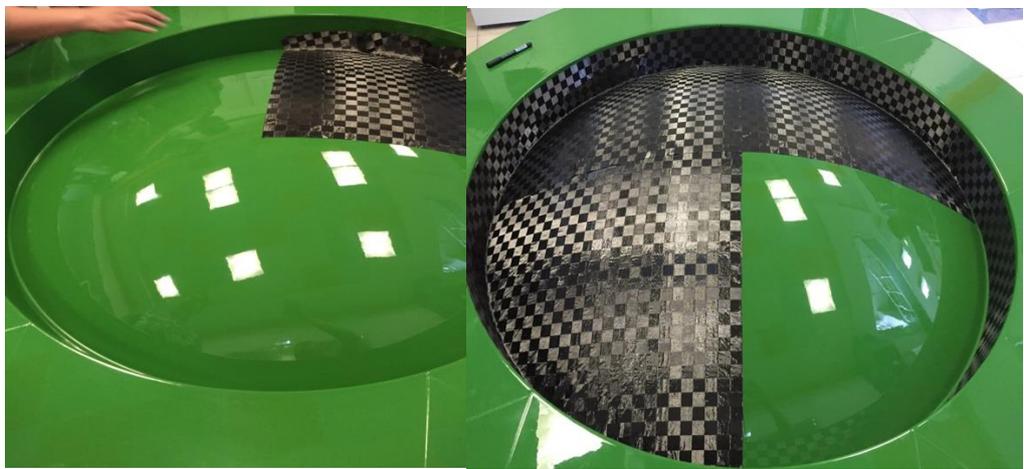


Рис. 3.19. Выкладка армирующих материалов (по варианту 3)



Рис. 3.20. Выкладка жертвенного слоя и сетки

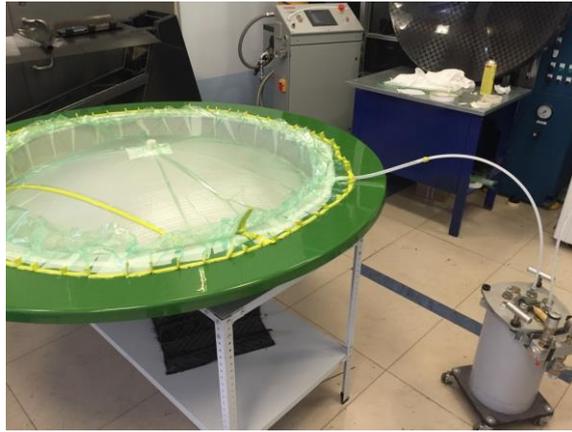


Рис. 3.21. Проверка герметичности вакуумного пакета

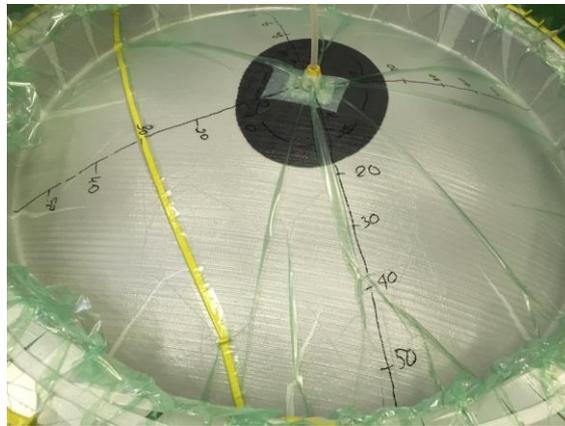


Рис. 3.22. Внешний вид вакуумного пакета до начала процесса пропитывания

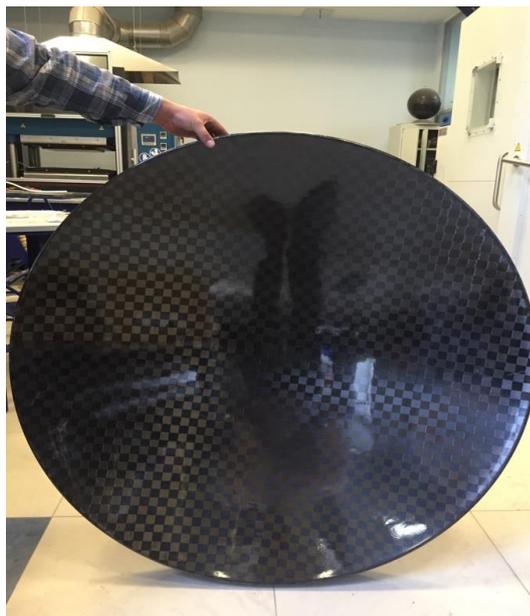


Рис. 3.23. Рефлектор после процесса пропитывания

В работе изготовлена полномасштабная модель рефлектора ЛА и проведено сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований (рис. 3.24, табл. 3.3).

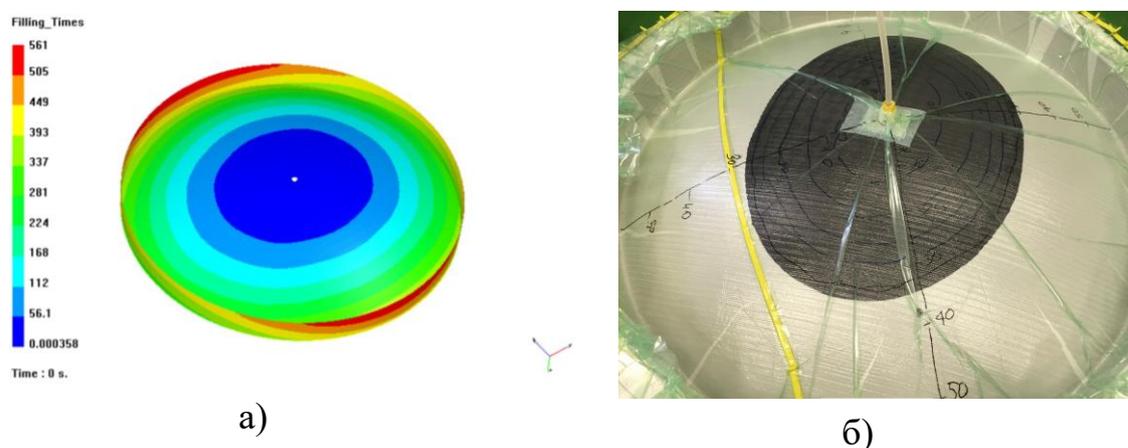


Рис. 3.24. Результаты расчета (а) кинетики процесса пропитывания и фото образца (б) непосредственно в процессе пропитывания

Таблица 3.3. – Время пропитывания

Рефлектор	Время пропитывания, сек		Погрешность, %
	Теоретическое	Экспериментальное	
Диаметр 1200 мм	561	580	3

В результате проведенных исследований установлено, что погрешность между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 3%. Таким образом, разработанные математические модели позволяют достоверно оценить кинетику процесса пропитывания.

3.5. Выводы по 3 главе

1. Установлено, что при выкладке ткани на поверхности рефлектора максимальное расстояние без образования складок составляет 500мм для ткани Нехсел, 324 мм для Аспро А-60 и 264 мм для Аспро А-80 (см. рис 3.6).

В работе сделано предположение, что плохая драпируемость связана с очень низкой пористостью. Для исключения образования складок при выкладке ткани на поверхность оснастки двойной кривизны, необходимо использовать материалы с большими значениями пористости.

2. Экспериментально определены рациональные схемы выкладки с учетом минимизации количества складок. Для заданной конструктивно-компоновочной схемы рефлектора определены координаты критических точек и установлено, что по мере удаленности от критической точки имеет место уменьшение расстояний между ячейками с 44мм до 34мм, что и вызывает образование складок. Схема выкладки №2, при которой угол ткани совпадает с центром рефлектора, является более предпочтительной, чем схема №1, при которой центр ткани совпадает с центром рефлектора.

3. Экспериментально определены рациональные схемы выкладки с учетом минимизации количества складок. Установлено, что вариант, при котором ткань выкладывается четырьмя кусками (каждая часть представляет собой квадрат, размером 150мм×150мм), является наиболее рациональным.

4. В результате проведенных исследований установлено, что погрешность между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 3%, что позволяет рекомендовать разработанные математические модели для их практического применения.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ

Процесс отверждения изделий из ПКМ является наиболее продолжительной технологической операцией и поэтому необходим поиск рациональных режимов нагрева, что позволило бы сократить время и, соответственно, снизить себестоимость готовых изделий [49,68,128].

4.1. Модели теплообмена в процессе отверждения полимерных композиционных материалов без учета экзотермических эффектов

При моделировании теплообмена, происходящего в ПКМ в процессе отверждения связующего, первоначально необходимо определить температурные поля, возникающие в материале при различных видах теплообмена [8, 55, 56]. Решение этой задачи (при использовании метода конечных элементов) состоит из следующих основных этапов [77-79]:

1. Постановка задачи;
2. Создание адекватной геометрии модели;
3. Разбиение модели на конечные элементы;
4. Определение граничных условий;
5. Численное решение системы уравнений;
6. Анализ результатов.

Для моделирования процесса отверждения использована программа Femap Nastran. В качестве объекта был выбран рефлектор ЛА, диаметром 1200 мм и толщиной 0,6 мм (ранее изготовленный, см. главу 3). Модель создана в системе Visual Environment, геометрическая модель рефлектора показана на рис 4.1.

Рефлектор изготовлен из углепластика на основе углеродной ткани Аспро А-80 и эпоксидного связующего Araldite LY 8615/ХВ 5173 (теплофизические свойства которого приведены в табл. 4.1) [64, 130], процесс отвер-

ждения проводился в электропечи, имеющей необходимые размеры рабочего пространства. Оснастка для формования также изготавливалась из углепластика на основе углеродной ткани Twill 2/2 3K (T240) и Twill 2/2 12K (T450) и эпоксидного связующего Araldite LY 8615/XB 5173 [149]. Толщина оснастки составляла 8 мм.

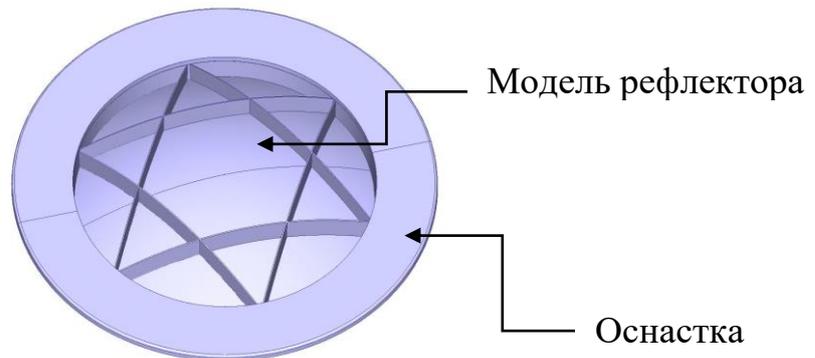


Рис. 4.1. Геометрическая модель рефлектора и оснастки

Таблица 4.1. –Теплофизические свойства материалов

Характеристика	Конструкция	
	Рефлектор	Оснастка
Плотность, кг/м ³	1550	1570
Коэффициент теплопроводности (для оснастки в направлениях осей анизотропии), Вт/(м·К)	31	(0,5/10/10)
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	1000	1000
Степень черноты	0,85	0,85
Толщина, мм	0,6	8
Коэффициент линейного термического расширения (для оснастки в направлениях осей анизотропии), К ⁻¹	5,27·10 ⁻⁶	(0,519/0,519/362)·10 ⁻⁶

Заданный режим отверждения приведен на рис. 4.2: скорость нагрева – $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (участок I и III) и охлаждения – $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (на участке V), первая выдержка при температуре 125°C – 60 мин, вторая выдержка 180°C – 300 мин.).

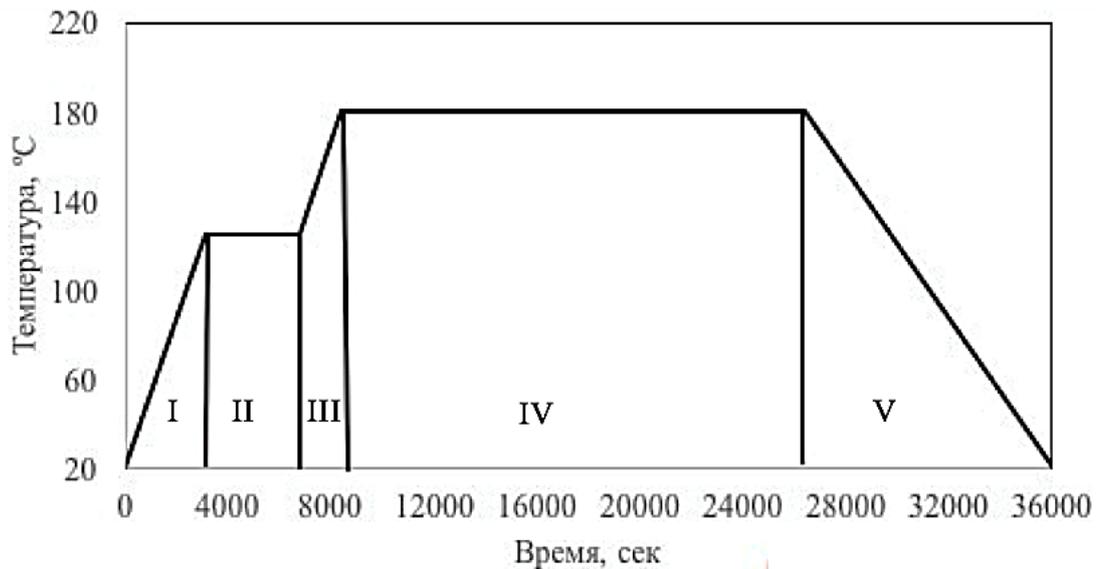


Рис. 4.2. Заданный (базовый) режим отверждения

Задача математического моделирования решалась в два этапа:

- 1) Определение температурных полей в заготовке во время процесса отверждения без учета тепловыделения в процессе химической реакции отверждения;
- 2) Определения температурных полей в заготовке с учетом тепловыделения.

Для построения физической модели на первом этапе (без учета тепловыделения) принимаются следующие допущения:

- 1) Нагрев рефлектора в процессе отверждения связующего осуществляется с помощью вынужденной конвекции с коэффициентом теплоотдачи $5 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{K}$ [147];

- 2) Охлаждение рефлектора в процессе отверждения связующего осуществляется с помощью конвекции с коэффициентом теплоотдачи $5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$;
 - 3) Излучение с поверхности рефлектора;
 - 4) Нагрев осуществляется плавно и обеспечивается равномерная температура воздуха в камере электропечи;
 - 5) Учитываются теплофизические свойства оснастки;
 - 6) Не учитываются тепловыделения в материале рефлектора при полимеризации;
 - 7) Не учитывается изменение геометрических параметров рефлектора в процессе отверждения;
 - 8) Не учитывается изменение физико-механических и оптических свойства рефлектора;
 - 9) Химическое взаимодействие в объеме заготовки в процессе отверждения также не учитывается;
 - 10) Применяемые материалы являются ортотропными.
- Геометрическая модель рефлектора разбита на 24125 Quad-Tria элементов с использованием Торо-Mesh (рис. 4.3.).

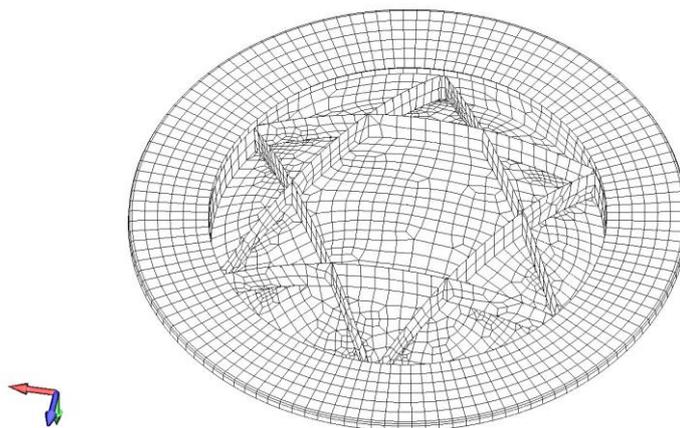


Рис. 4.3. Конечно-элементная модель рефлектора в системе

Visual Environment

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

- 1) Конвекция по режиму отверждения на рис.4.2, коэффициент теплоотдачи $5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$;
- 2) Излучение с поверхности рефлектора.

При моделировании задач теплопроводности основной искомой величиной является температура в узлах конечно-элементной сетки, и чем меньше шаг и выше частота, тем точнее будут полученные результаты. При расчете плоского образца были заданы следующие режимы: количество шагов 120000, начальный временной шаг 0,3, максимальное количество итераций на шаге 10, фрагмент интерфейса программы, в которой задавались данные режимы, показан на рис. 4.4.

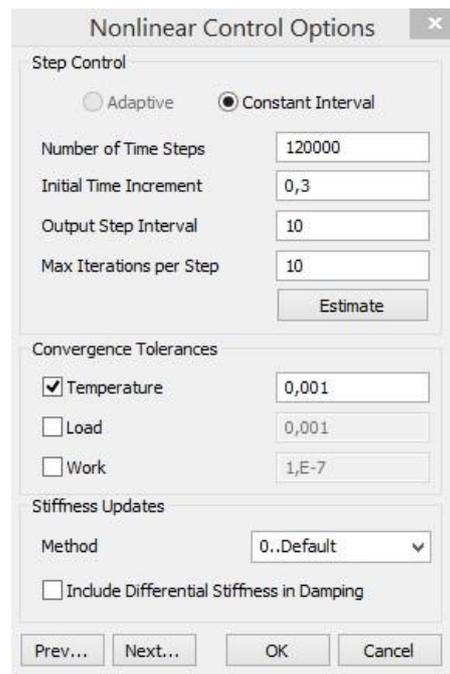


Рис. 4.4. Фрагмент интерфейса программы, в котором задается точность проводимого расчета

Соответствие заданной точности полученным характеристикам материала и размерам конечных элементов проводили по формуле:

$$\Delta t \leq \frac{h^2 c \bar{\rho}}{\lambda} \frac{1}{10} \quad (4.1)$$

где h – минимальный размер конечно-элементной сетки.

Значение Δt , найденное по уравнению (4.1) соответствовало 0,6, однако в данной работе для повышения точности эта величина была уменьшена в 2 раза и составила 0,3.

Полученные результаты по распределению температур (без учета тепловыделения) во время процесса отверждения связующего показаны на рис. 4.5-4.9. Для удобства сравнения полученных результатов они сведены в таблицу (табл. 4.2) и показаны на рис. 4.10.

Таблица 4.2. – Результаты моделирования режима нагрева плоского образца

Участки режима нагрева в соответствии с рис. 3.2	Заданный режим нагрева		Без учета тепловыделения	
	Температура, °С	Время, сек	Температура, °С	Время, сек
I	Подъем до 125	3015	Подъем до 125	4800
II	Выдержка 125	6615	Выдержка 125	6615
III	Подъем до 180	8265	Подъем до 180	14240
IV	Выдержка 180	26625	Выдержка 180	26225
V	Охлаждение до 20	36225	Охлаждение до 20	38120

Как видно из полученных данных, на участке III, при заданной температуре 180°С, имеет место очень значительное уменьшение температуры, до 166,6°С, однако в течение 28 мин, происходит выход на заданный режим нагрева (180°С).

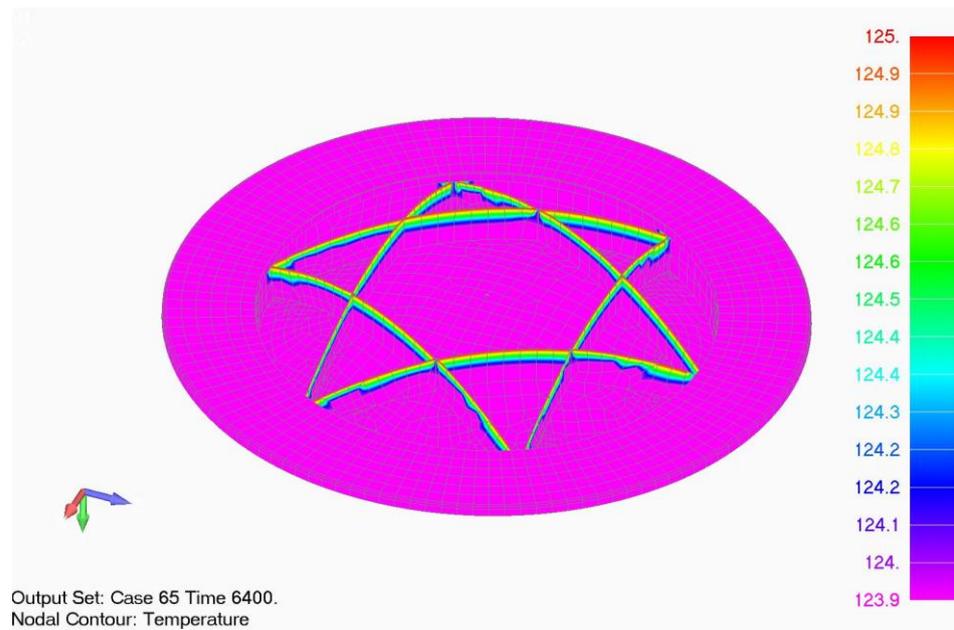


Рис. 4.5. Распределение температурных полей без учета тепловыделения (на 6400 сек прогрева)

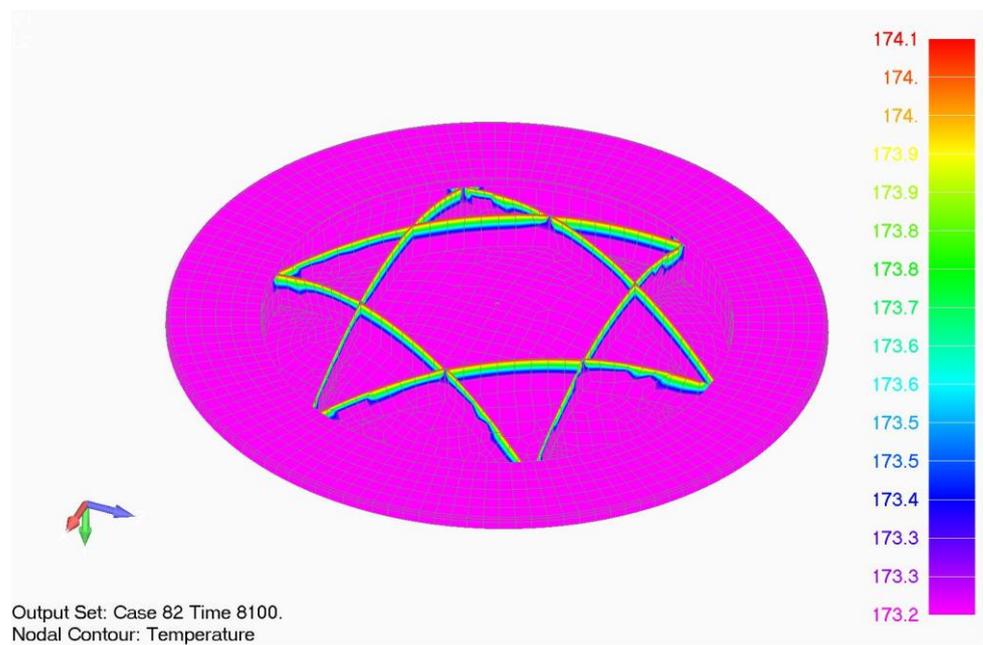


Рис. 4.6. Распределение температурных полей без учета тепловыделения (на 8100 сек прогрева)

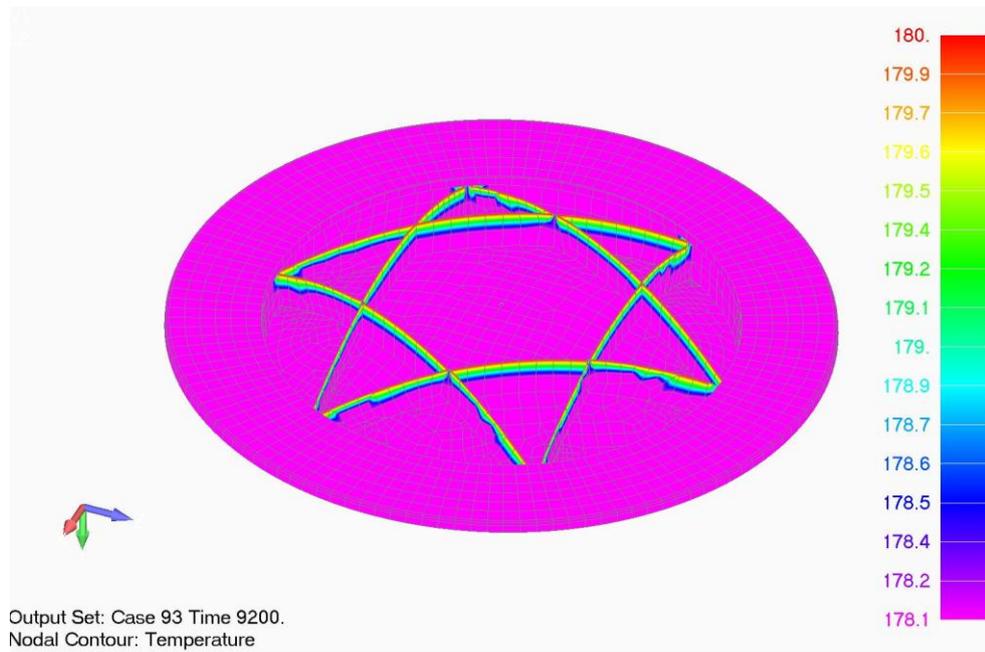


Рис. 4.7. Распределение температурных полей без учета тепловыделения (на 9200 сек прогрева)

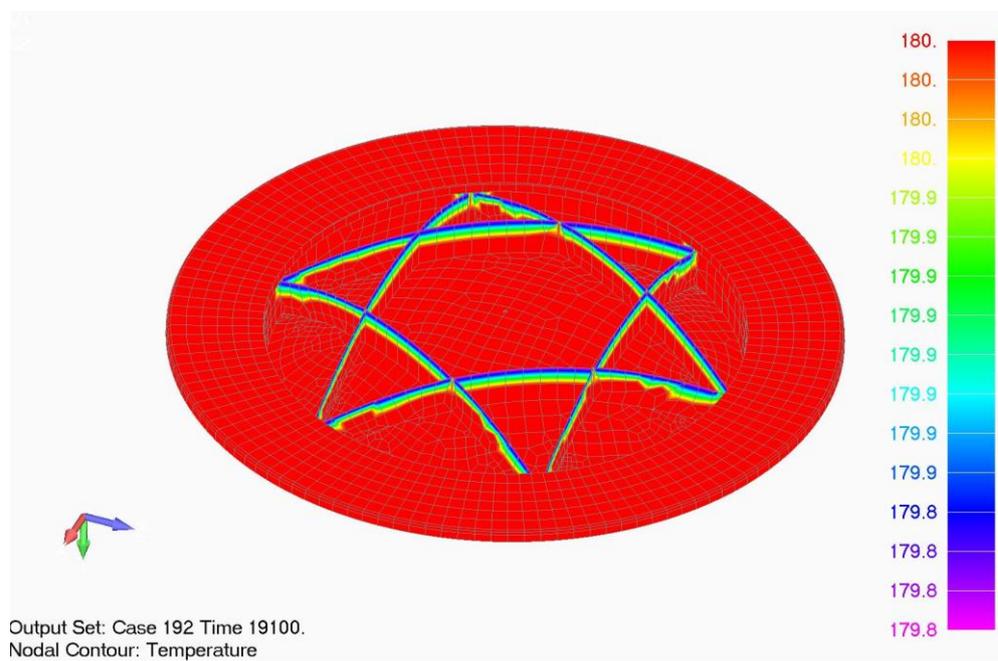


Рис. 4.8. Распределение температурных полей без учета тепловыделения (на 19100 сек прогрева)

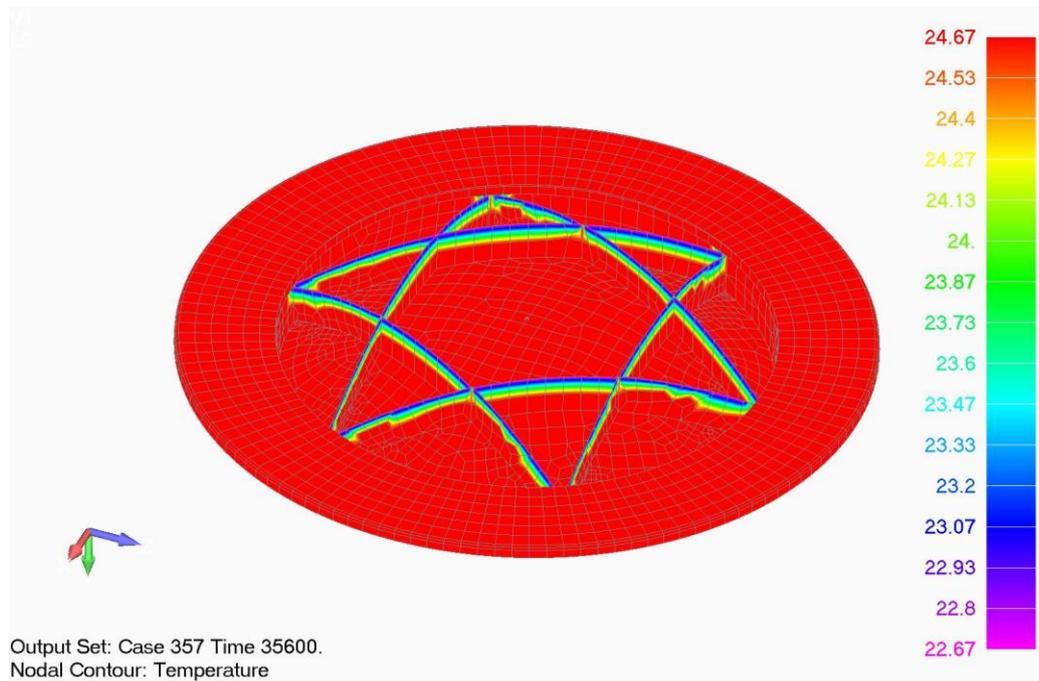


Рис. 4.9. Распределение температурных полей без учета тепловыделения (на 35660 сек прогрева)

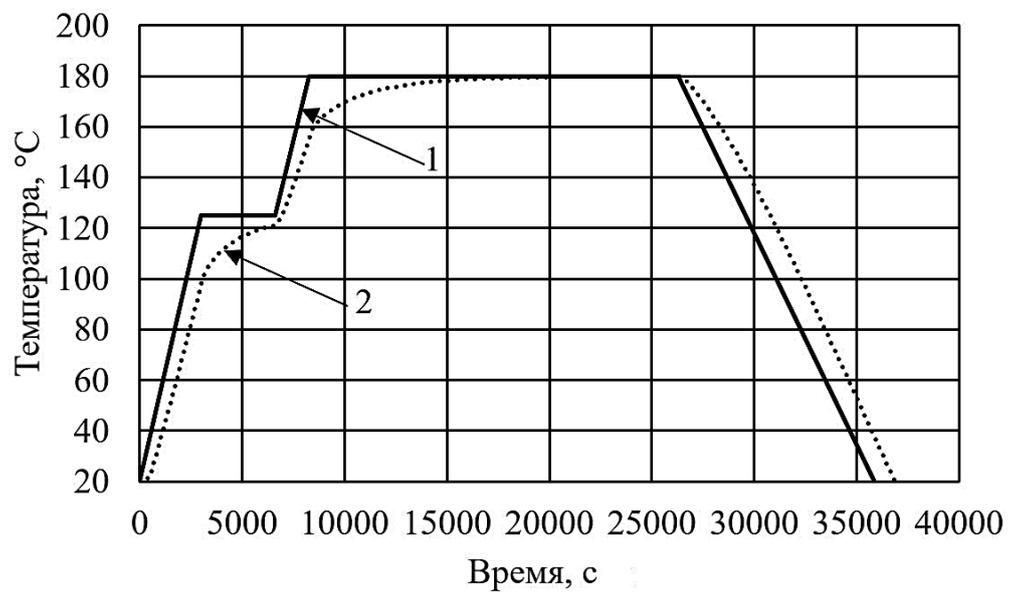


Рис. 4.10. Заданный (1) и фактический (2) режимы отверждения (без учета тепловыделения) верхней поверхности рефлектора (12546 node)

В результате проведенных расчетов было установлено, что, заданная температура в 180°C устанавливается на 8265 сек, если при расчетах используется модель без учета тепловыделения, то заданная температура достигается 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°C.

4.2. Модели теплообмена в процессе отверждения полимерных композиционных материалов с учетом экзотермических эффектов

Приведенные в разделе 4.1 результаты расчета были получены без учета теплоты, выделяемой в процессе отверждения эпоксидного связующего, что не соответствует реальным материалам. Для учета экзотермического эффекта было использовано уравнение теплопроводности Фурье, которое для модели теплопроводности имеет вид (без учета конвекции) [142-144]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 2k_{xz} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho H_r \frac{d\alpha}{d\tau} \quad (4.2)$$

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.

Количество выделяемого в процессе отверждения тепла фактически является характеристикой степени отверждения α , поскольку степень отверждения в начале реакции равна нулю, а при полном отверждении $\alpha=1$.

$$\alpha = \frac{H}{H_r} \quad (4.3)$$

где H – количество теплоты, выделяющееся при данном режиме отверждения.

$$H = \int_0^{\tau} H d\tau \quad (4.4)$$

Скорость тепловыделения в процессе отверждения определяем по формуле.

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{1}{H_r} \cdot \frac{dH}{d\tau} \quad (4.5)$$

Для ступенчатого изотермического отверждения уравнение (4.5) имеет вид

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = k\alpha^m(1-\alpha)^n \quad (4.6)$$

При $\alpha=0$ и $t=0$, коэффициенты m и n являются постоянными. Значения коэффициента k зависит от кинетики процесса отверждения

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.7)$$

где A , E – предэкспоненциальный множитель и кажущаяся энергия активации соответственно; T – абсолютная температура, R – универсальная газовая постоянная.

Значение энергии активации E определяем из уравнения Kissinger (Киссинджера) [12, 13].

$$-\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = \frac{E}{RT} - \ln\left(\frac{AR}{E}\right) \quad (4.8)$$

где T_p^2 – максимальная экзотермическая температура.

Учет экзотермического эффекта оцениваем по уравнению

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{\beta} k\alpha^m(1-\alpha)^n \quad (4.9)$$

где β – скорость нагрева, равная dT/dt .

Кинетику процесса отверждения можно предсказывать с помощью уравнения 4.9. В общем виде, поведение эпоксидного связующего при отверждении, описывается моделью n -го порядка [98-99]. Таким образом, с использованием уравнения (4.9) можно определить кинетику процесса от-

верждения любого термореактивного связующего, которое используется при производстве изделий из ПКМ.

4.3. Моделирование экзотермических эффектов в процессе отверждения эпоксидного связующего

Для количественной оценки количества теплоты, выделяемой в процессе отверждения связующего, использовался дифференциально сканирующий калориметр модели DSC 204 F1 Phoenix (рис. 4.11). В качестве эталона использовался пустой тигель [14, 27].



Рис. 4.11. Внешний вид дифференциально-сканирующего калориметра DSC 204 F1 Phoenix (а) и установка образца для проведения испытаний (б)

Для одного и того же образца связующего (Araldite LY8615+ XB 5173) проводили несколько последовательных опытов, отличающихся между собой скоростью нагрева. Количество выделяемого тепла определяли по площади экзотермического пика. Полученные результаты, для удобства сравнения, показаны в табл. 4.3 и рис.4.12.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение скорости нагрева образца от $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до $20^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ 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 °С до 202,28 °С.

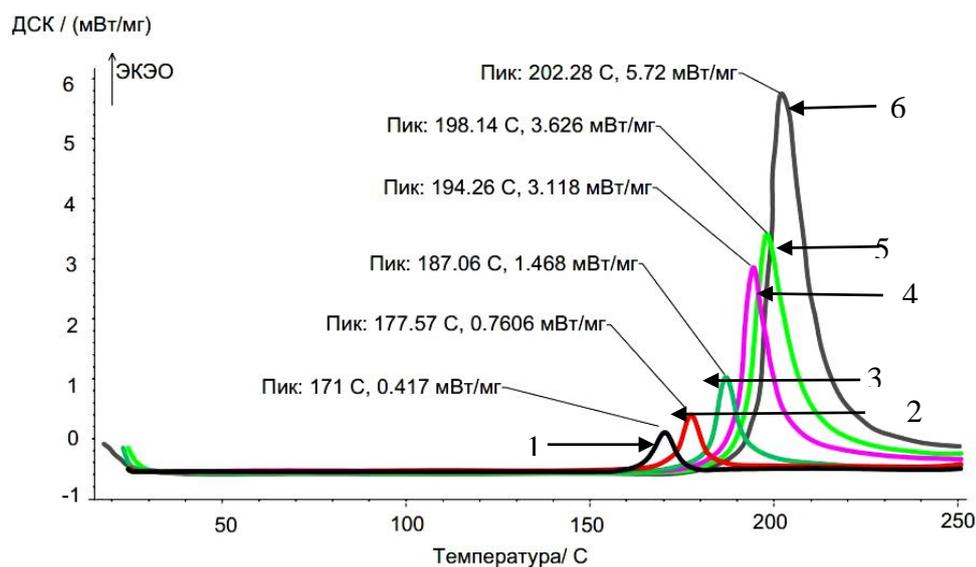


Рис. 4.12. Кривые ДСК эпоксидного связующего при скорости нагрева: 1 – 1°С/мин; 2 – 1 °С/мин; 3 – 5°С/мин; 4 – 10°С/мин; 5– 15°С/мин; 6– 20°С/мин

Таблица 4.3. – Количество теплоты, выделяемой в процессе отверждения эпоксидного связующего Araldite LY8615+ XB 5173

Скорость нагрева, °С/мин	Максимальное значение температур, °С	Количество теплоты, выделяемой в процессе отверждения, Дж/г
1	171,3	115,4
2	177,57	194,3
5	187,06	196,3
10	194,26	224,5
15	198,14	225,2
20	202,28	263,6

Полученные значения количества выделяемого тепла (при скорости нагрева 2°С/мин) были использованы при моделировании в программе Femap Nastran. Для построения физических моделей, с учетом тепловыделения, принимаются следующие допущения:

- 1) Процессы нагрева, выдержки при заданной температуре на каждой ступени и охлаждения при отверждении рефлектора из углепластиков осуществляется с помощью конвекции с коэффициентом теплоотдачи 5 Вт/м²·К;
- 2) Тепло отводится с поверхности рефлектора и оснастки излучением;
- 4) Температура воздуха в камере электропечи обеспечивается равномерной;
- 5) Теплофизические свойства применяемых материалов оснастки учитываются;
- 6) Учитываются тепловыделения в материале рефлектора при полимеризации;
- 7) Изменение геометрических параметров конструкции рефлектора и оснастки в процессе отверждения не учтено;
- 8) Физико-механических и оптических свойства рефлектора в процессе отверждения не изменяются;
- 10) Используемые материалы рефлектора и оснастки считаются ортотропными.

Для решения задач использован метод конечных элементов, в программе Femap Nastran.

При расчетах были приняты следующие граничные условия:

- 1) Конвекция режима отверждения (рис.4.2.) и коэффициент теплоотдачи 5 Вт/м²·К;
- 2) Излучение с поверхности рефлектора в окружающую среду;
- 3) Внутреннее тепловыделение происходит в объеме образца рефлектора по схеме, приведенной на рис 4.13;

- 4) Теплофизические свойства связующего зависят от температуры.
Полученные результаты показаны на рис.4.14-4.19.

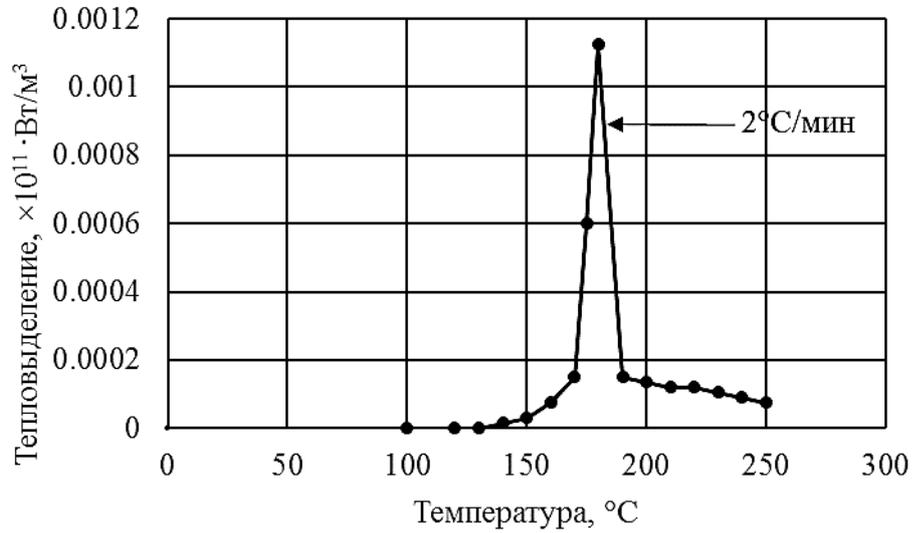


Рис. 4.13. Функция тепловыделения в программе Femap Nastran

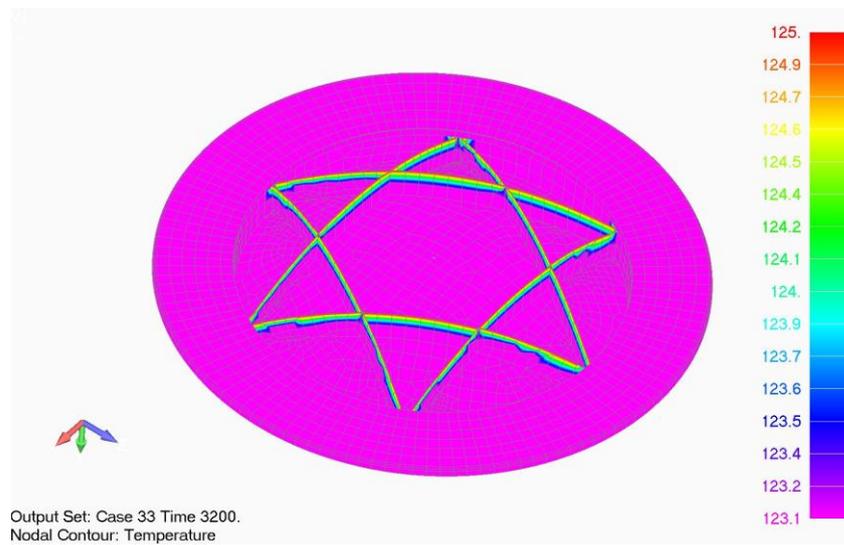


Рис. 4.14. Распределение температурных полей с учетом тепловыделения
(на 3200 сек прогрева)

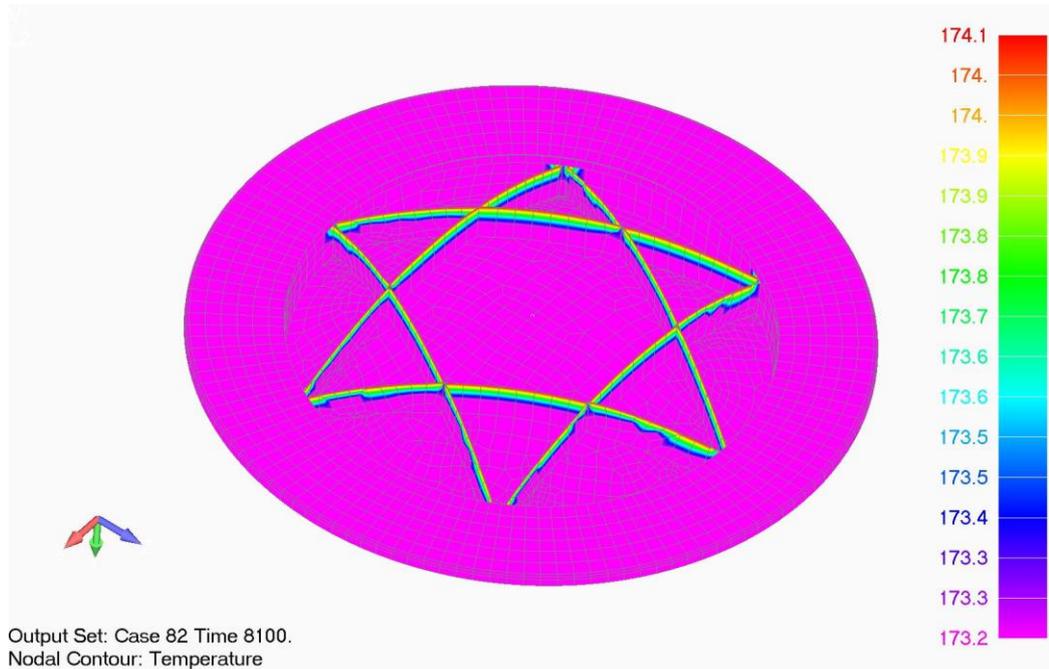


Рис. 4.15. Распределение температурных полей с учетом тепловыделения
(на 8100 сек прогрева)

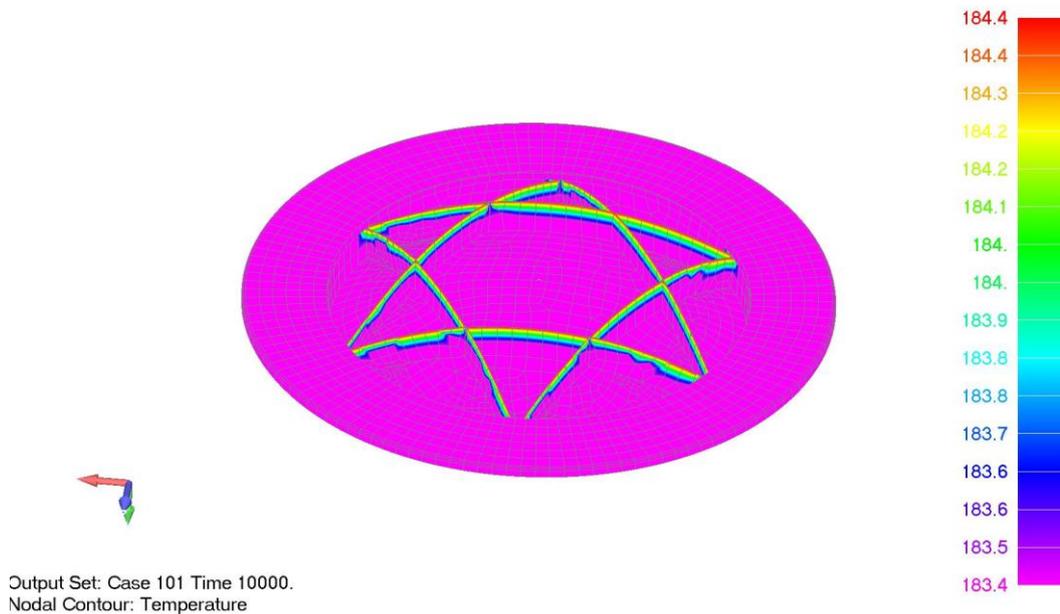


Рис. 4.16. Распределение температурных полей с учетом тепловыделения
(на 11000 сек прогрева)

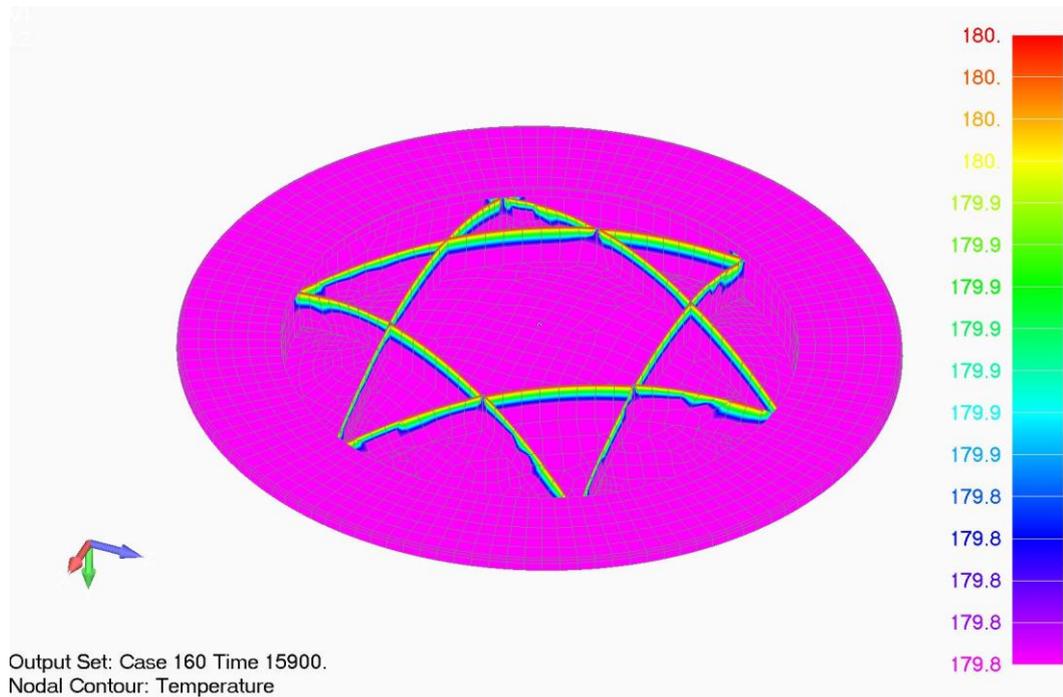


Рис. 4.17. Распределение температурных полей с учетом тепловыделения
(на 26400 сек прогрева)

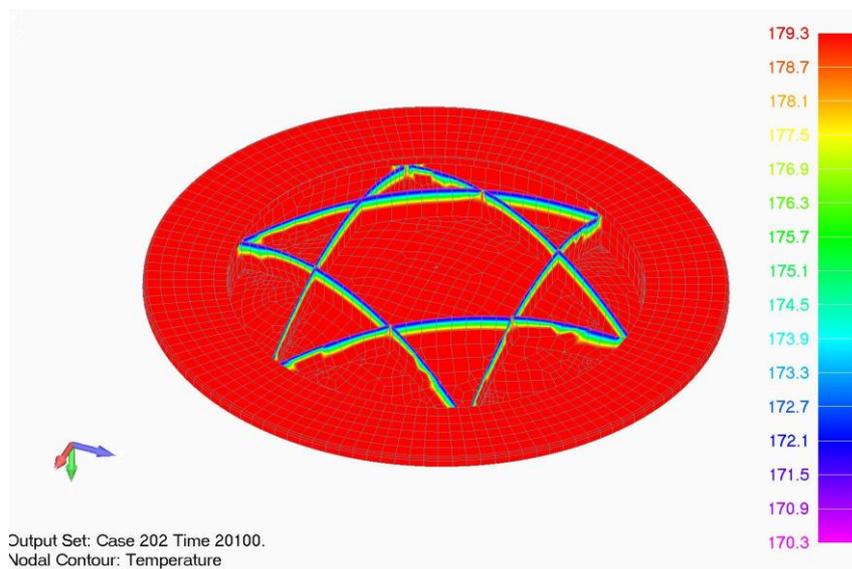


Рис. 4.18. Распределение температурных полей с учетом тепловыделения
(на 20100 сек прогрева)

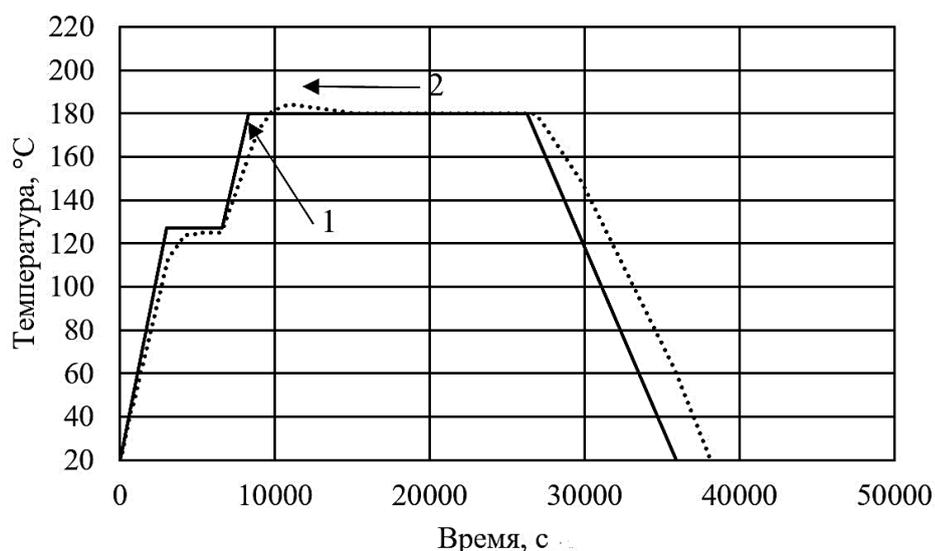


Рис. 4.19. Заданный (1) и фактический (2) режимы отверждения (с тепловыделением) верхней поверхности рефлектора (12546 node)

В результате проведенных расчетов было установлено, что, заданная температура в 180°C устанавливается на 9980 сек. С учетом результатов моделирования, определен режим нагрева и, как следует из полученных данных (рис.4.9), он не соответствует заданному на всех участках нагрева.

Найденные значения тепловых эффектов позволили определить константы в уравнении (4.2 –4.9), значения которых приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. – Константы кинетики процесса отверждения для эпоксидного связующего Araldite LY8615+ XB 5173

Параметры	Значения
A (S^{-1})	$9,17 \cdot 10^6$
E (кДж/моль)	7289
m	0,85
n	1,15
R (Дж/моль·К)	8,31
H (Дж/г)	194,3

Таким образом, в результате проведенных расчетов установлено, что при увеличении скорости нагрева количество выделяемого в процессе от-

верждения тепла также увеличивается. Полученные расчетные константы будут далее использоваться при моделировании кинетики процесса отверждения в программе PAM-RTM.

Разработанная модель процесса отверждения связующего с учетом тепловых эффектов, позволяет определять температуру и продолжительность нагрева на каждом этапе отверждения.

4.4. Моделирование кинетики процесса отверждения рефлектора зеркальной космической антенны

Для реального изделия из углепластика, в качестве которого использовалась полномасштабная модель рефлектора зеркальной космической антенны диаметром 1200 мм, была создана геометрическая модель (см. рис. 4.1 и рис. 4.3).

Используя ранее полученные результаты (см. табл. 4.4), в работе был проведен расчет степени отверждения. Интерфейс программы показан на рис. 4.20, полученные результаты приведены на рис. 4.21 и 4.22.

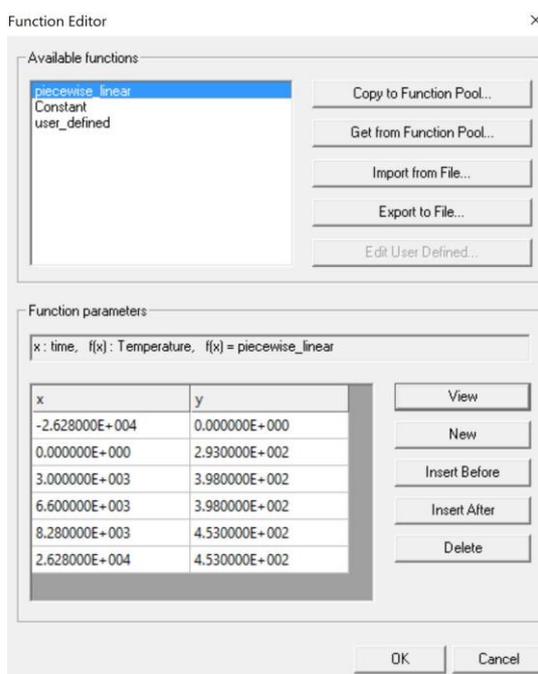


Рис. 4.20. Интерфейс программы при определении кинетики процесса отверждения рефлектора ЛА

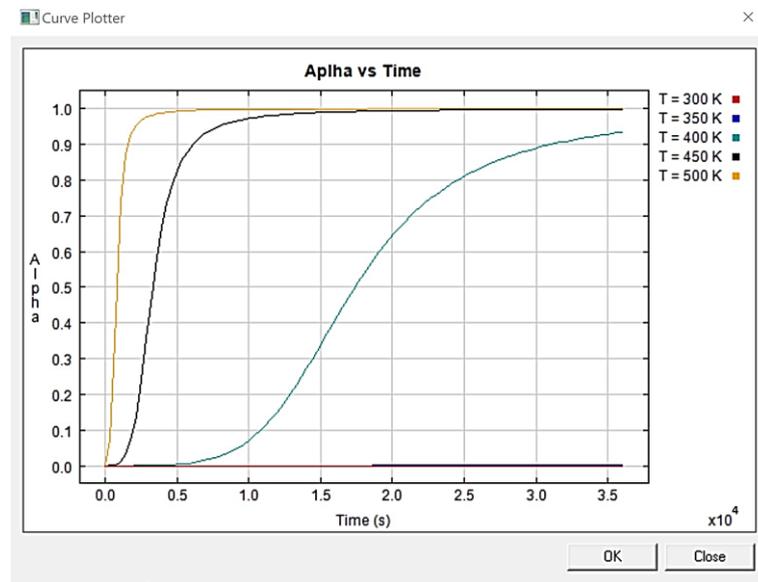


Рис. 4.21. Зависимости степени отверждения от времени и температуры

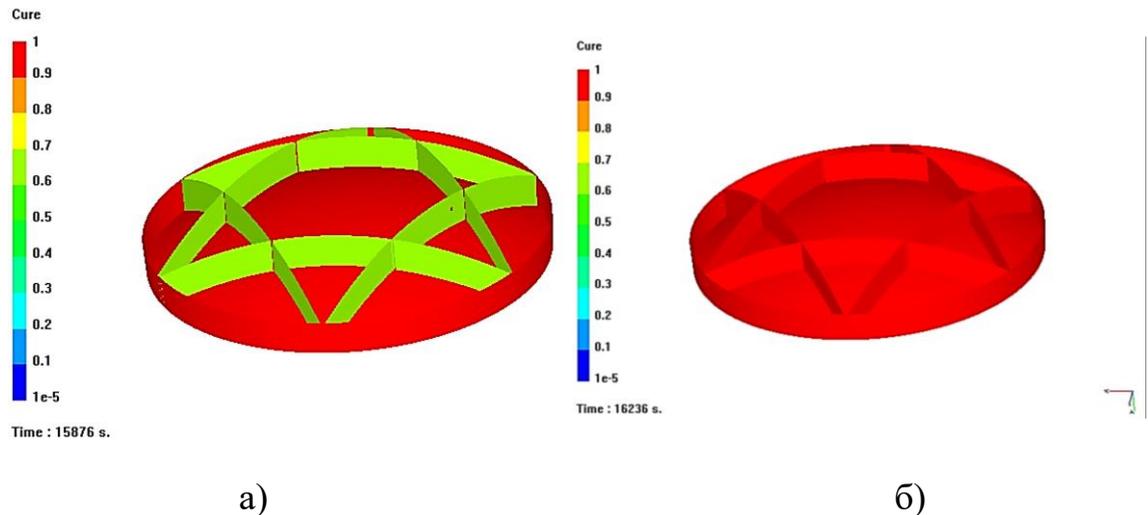


Рис. 4.22. Моделирование процесса отверждения в различные моменты времени: на 15846 сек (а) и на 16236 сек (б)

В результате проведенных исследований установлено, что заданная температура в 180°C достигается за 9980 сек. На 16236 сек нагрева имеет место равномерное температурное поле образца, что позволяет уменьшать температуру выдержки на участке IV (см. рис. 4.2). Выбранный в результате ранее проведенных исследований, режим отверждения приведен в табл. 4.5. Скорость подъема температуры составила $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Таблица 4.5 – Заданные и предлагаемые режимы отверждения

Участки режима нагрева в соот- ветствии с рис. 4.2	Без учета тепловыделения		С учетом тепловыделением	
	Температура, °С	Время, сек	Температура, °С	Время, сек
I	Подъем до 125	6600	Подъем до 125	6600
II	Выдержка 125	6615	Выдержка 125	6615
III	Подъем до 180	14240	Подъем до 180	9980
IV	Выдержка 180	26225	Выдержка 180	19200
V	Охлаждение до 20	36225	Охлаждение до 20	28800

Далее в работе было проведено экспериментальное исследование кинетики процесса отверждения рефлектора. Для отверждения использовалась стандартная лабораторная электрическая печь серии XU, в которой в ручном режиме были установлены режимы отверждения (см. табл. 4.5). Полученные результаты приведены в табл. 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6. – Режимы отверждения, определенные теоретически и экспериментально

№ участка по рис. 3.2	Температура, °С	Время, мин		Погрешность, %
		Экспериментальное	Теоретическое	
I	125	105	110	5
III	180	51	56	8
V	20	149	160	7

Таблица 4.7. – Значения времени при выдержках, определенное экспериментально и теоретически

№ п/п	Температура, °С	Время, мин		Погрешность, %
		Экспериментальное	Теоретическое	
II	124	25	27	5
IV	180	139	153	9

В результате проведенных исследований установлено, что между теоретическими и экспериментальными результатами имеет место погрешность, которая не превышает 10%, что позволяет рекомендовать разработанную расчетную модель для оценки параметров кинетики процессов отверждения конструкций рефлектора.

4.5. Задача оптимизации скорости нагрева режима отверждения

Исходными данными для задачи оптимизации являются зависимости содержания пористости и предела прочности от скорости нагрева при отверждении. Данные параметры представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8. – Исходные данные для оптимизации скорости нагрева

№ режим отверждения	Скорость нагрева, °С/мин	Пористости, %	Предел прочности при растяжении, МПа
1	1	2,5	2100
2	2	2,8	1900
3	5	3	1700
4	10	4,5	1300
5	15	6	1000

Данные параметры были нормированы по соответствующим максимальным значениям, т.е.

$$g_{\text{норм}} = \frac{g}{g_{\text{max}}} \quad (4.10)$$

где g – исследуемый параметр (предел прочности при растяжении и содержание пор).

Нормированные значения содержания пористости представлены в таблице 4.9, а прочности – в таблице 4.10:

Таблица 4.9. – Нормированные значения пористости

№ режима отверждения	Скорость нагрева, °С/мин	Нормированные значения содержания пористости
1	1	$\frac{2,5}{5} = 0,5$
2	2	$\frac{2,8}{5} = 0,56$
3	5	$\frac{3}{5} = 0,6$
4	10	$\frac{4}{5} = 0,8$
5	15	$\frac{5}{5} = 1$

Таблица 4.10. – Нормированные значения прочности

№ режима отверждения	Скорость нагрева, °С/мин	Нормированные значения предела прочности
1	1	$\frac{2266}{2266} = 1$
2	2	$\frac{2050}{2266} = 0,9046$
3	5	$\frac{1700}{2266} = 0,75$
4	10	$\frac{1300}{2266} = 0,57$
5	15	$\frac{1100}{2266} = 0,48$

На рис. 4.23 приведены значения прочности и пористости в зависимости от режима отверждения.

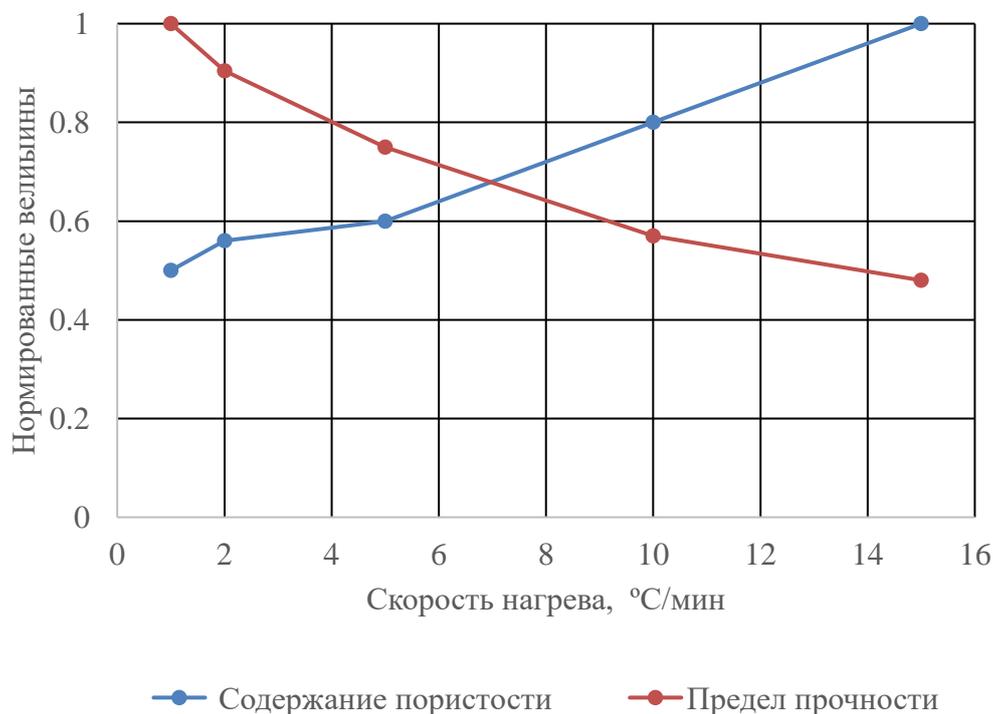


Рис. 4.23. Нормированные зависимости исследуемых параметров, от скорости нагрева

При принятии решения о равновесности двух критериев, вариант №3 (скорость нагрева 5°С/мин) является оптимальным. Для рассматриваемого связующего эта экономия времени составляет 71 мин.

4.6. Оценка качества рефлектора

Точность изготовления оценивается несколькими показателями: равнотолщинность и пористость, значения которых определяют по всей площади рефлектора (чем меньше значения показателей и меньше их дисперсия, тем выше точность).

Оценку качества изготовленных образцов рефлектора проводили с использованием компьютерного микротомографа высокого разрешения

марки Bruker Skyscan 1172. Для исследований были вырезаны образцы из различных участков рефлектора, которые для удобства анализа были пронумерованы (рис. 4.24).

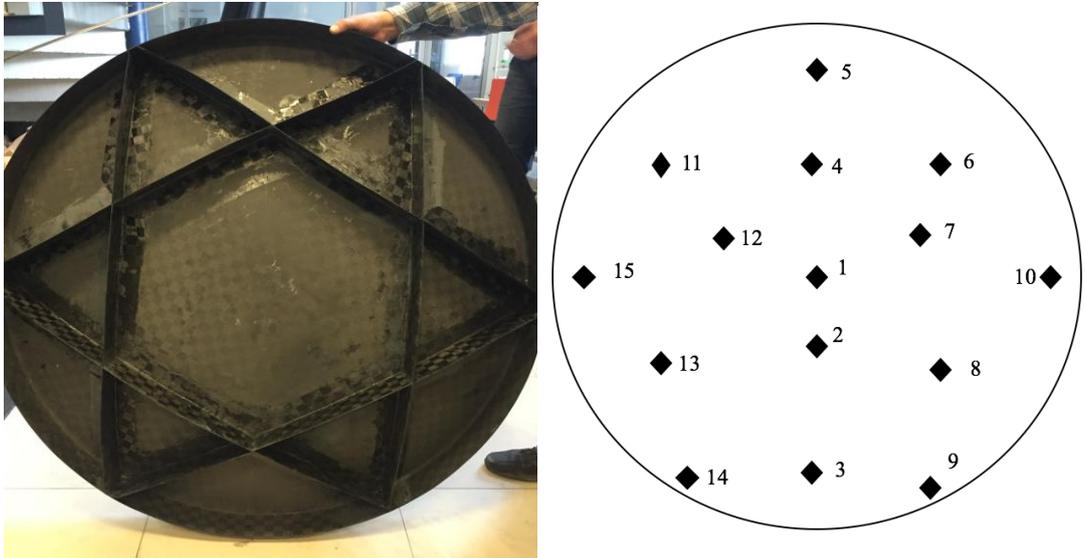


Рис. 4.24. Фото рефлектора с указанием мест, из которых были изготовлены образцы для структурного анализа

Образцы под номерами 1-15 были вырезаны из различных участков зеркальной поверхности (см. рис. 4.24), образцы под номерами 16 и 17 – из ребер. Используемый микротомограф, наряду с визуализацией структуры, также позволял в автоматическом режиме определять пористость и толщину образца. Полученные результаты показаны на рис. 4.25 – 4.26 и в табл. 4.11.

Проведенные результаты показали, что пористость не превышает 3%. Изменение толщины конструкции в различных участках не превышает 0,003 мм (рис 4.27).

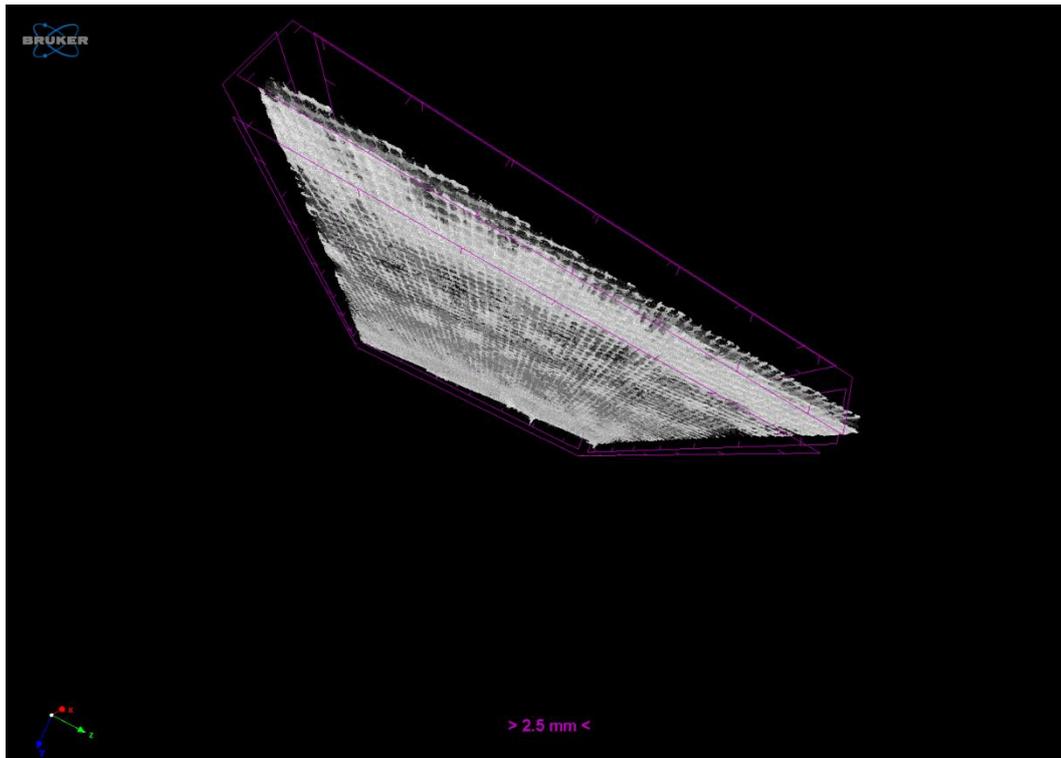


Рис. 4.25. Фото структуры образца №7

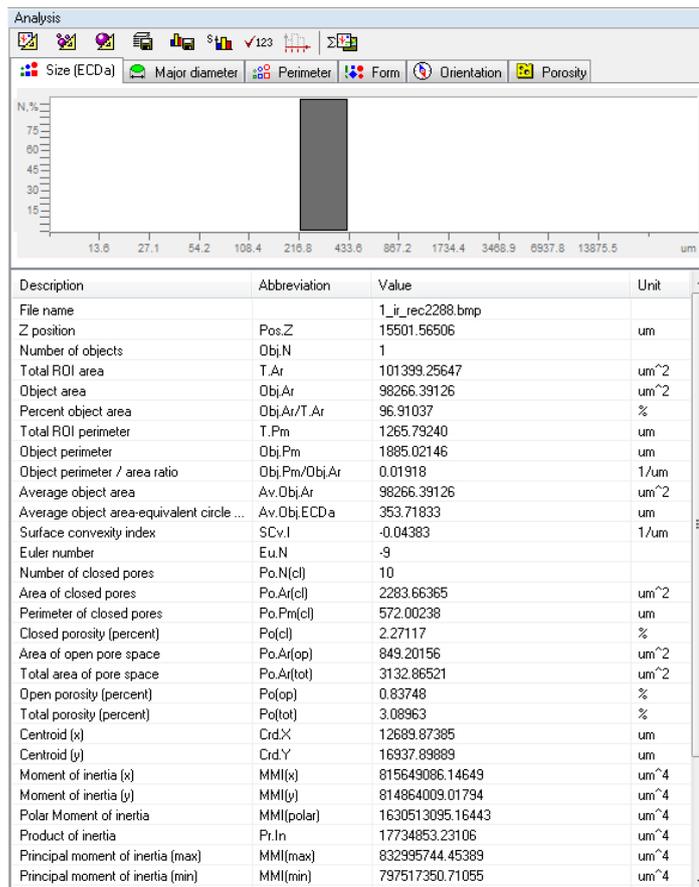


Рис. 4.26. Интерфейс программы определения пористости с помощью Bruker Skyscan

Таблица 4.11 – Пористость материала и толщина на различных участках рефлектора

№ образца, в соответствии с рис. 4.25	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
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

Анализ полученных результатов показывает, что средняя толщина различных образцов отражающей поверхности рефлектора отклоняется от теоретической формы не больше 3 мкм. 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. В результате проведенных исследований установлено, что погрешность изготовления формы профиля меньше 15 мкм.

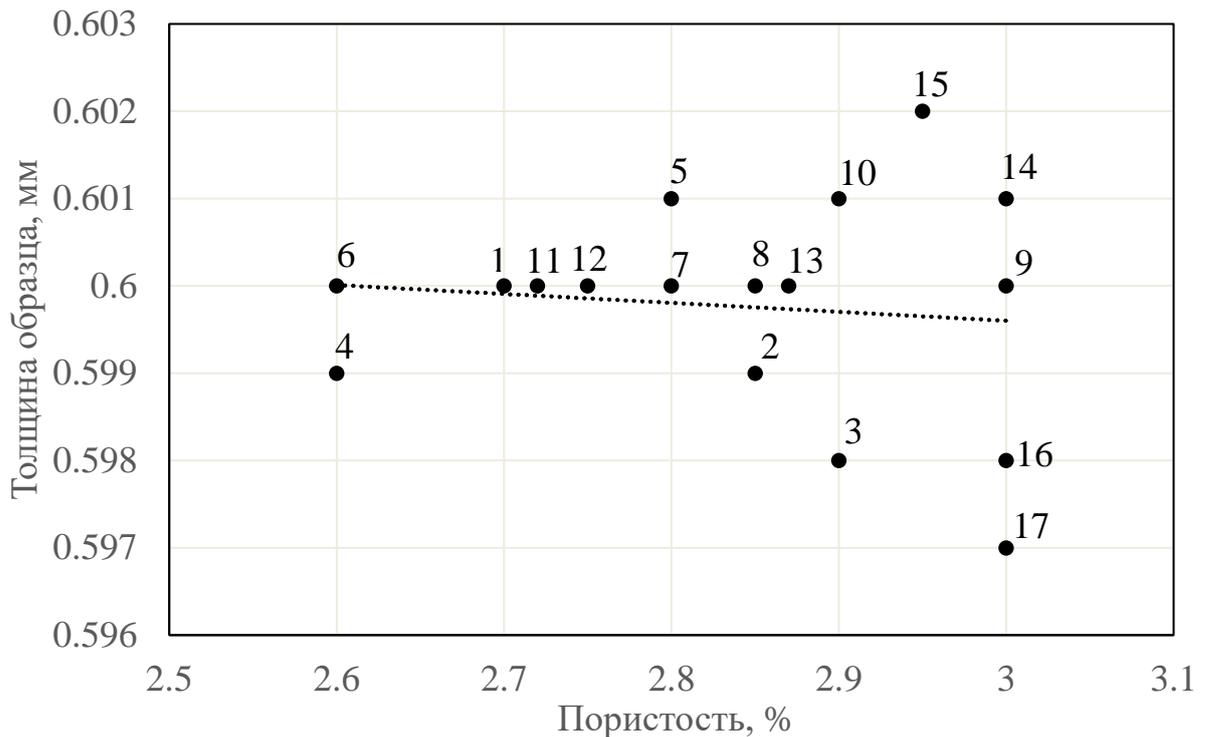


Рис. 4.27. Пористость материала и толщина на различных участках рефлектора (обозначения см. табл.4.11)

В настоящее время наиболее освоены частотные диапазоны L (1-2 ГГц, $\Lambda = 300-150$ мм), С (4-8 ГГц, $\Lambda = 75- 37,5$ мм), Ku (12-18 ГГц, $\Lambda = 25-16,7$ мм), растет интерес к системам спутниковой связи, работающим в высокочастотном диапазоне Ka (27-40 ГГц, $\Lambda = 11,1-7,5$ мм). Изготовленный рефлектор предназначен для системы межспутниковой связи, которая работает в диапазоне V (40- 75 ГГц, $\Lambda = 7,5-4,0$ мм). Вместе с ростом частоты растут требования к точности профиля антенного рефлектора. Допустимые отклонения формы и размеров рефлектора, вызванные нагреванием или охлаждением, должны лежать в пределах $\Lambda/50 - \Lambda/16$, где Λ – длина волны радиоизлучения [75]. Допустимые отклонения формы рефлектора приведены в таблице 4.12.

Сравнение полученных результатов (табл. 4.11) с допустимыми отклонениями (табл. 4.12) показало, что они удовлетворяют заданным требованиям точности.

Таблица 4.12 – Допустимое отклонение профиля антенны для различных частотных диапазонов

Частотные диапазоны	Длина волны Λ , мм	$\Delta = \Lambda/50 - \Lambda/16$, мм
L (1-2 ГГц)	300-150	6-9,375
C (4-8 ГГц)	75- 37,5	1,5-2,34
Ku (12-18 ГГц)	25-16,7	0,5-1,04
Ka (27-40 ГГц)	11,1-7,5	0,222-0,468
V (40- 75 ГГц)	7,5-4,0	0,15-0,25

Распространенной характеристикой антенны считается отношение Δ/D где Δ – допустимое отклонение профиля антенны от идеального; D – диаметр раскрыва. Для разработанного рефлектора достигнута величина $\Delta/D = (1-2) 10^{-5}$, это позволяет отнести изготовленный рефлектор к прецизионным деталям.

Точность изготовления оказывает влияние на величину коэффициента усиления и вид диаграммы направленности. Чем выше дисперсии, тем в итоге ниже чувствительность изготовленного рефлектора. Коэффициент усиления, или коэффициент направленного действия (КНД), показывает, во сколько раз мощность полезного сигнала на выходе антенны больше мощности того же сигнала при приеме на ненаправленную антенну. Для параболической антенны коэффициент усиления рассчитывается по формуле:

$$G = h - \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (4.11)$$

Где G – коэффициент усиления; h – эффективность антенны (КИП), для большинства антенн равен примерно 0.55; d – диаметр антенны; λ – длина волны.

Из уравнения (4.11) следует, что усиление антенны различно для разных длин волны. Для V диапазонов длина волны около 7,5 мм, антенна диаметром 1200 мм имеет коэффициент усиления около 164238. Для удоб-

ства, усиление спутниковых антенн указывается в спецификациях в логарифмических единицах: $G(\text{dB}) = 10 \log G = 29,5$.

Расчеты диаграммы направленности антенного рефлектора проводились с использованием пакета программ Ansys HFSS. При разработке геометрической модели облучателя (рис. 4.28) считалось, что рупор изготовлен из меди, а в его закрытом конце находится источник радиоволн. Граничные условия включали задание поля излучения источника (частота 60 ГГц) и условия прозрачности для радиоволн на внешней границе области. В результате моделирования были получены данные о диаграмме направленности облучателя (рис. 4.29 и 4.30).

Геометрическая модель рефлектора представлялась параболической оболочкой диаметром 1200 мм, толщиной 0,6 мм с фокусным расстоянием 500 мм. При проведении расчетов условно принимали, что коэффициент отражения радиоволн равен 1.

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 4.31–4.36 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 данной частоты уровень погрешности составляет 0,015 мм, что меньше допустимого.

Одновременно с рефлектором, были изготовлены образцы для проведения механических испытаний на растяжение и межслоевой сдвиг. Полученные результаты приведены в табл. 4.13. В качестве базового технологического режима использован стандартный режим отверждения (см. табл. 4.5).

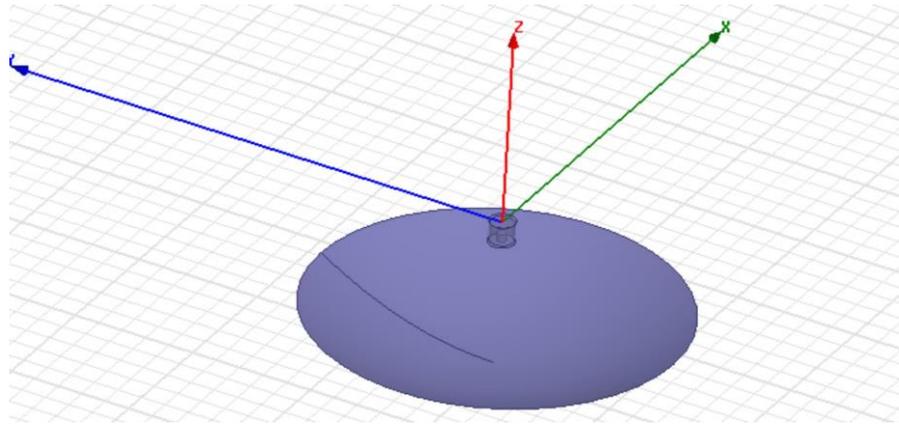


Рис. 4.28. Геометрические модели облучателя и рефлектора в HPSS

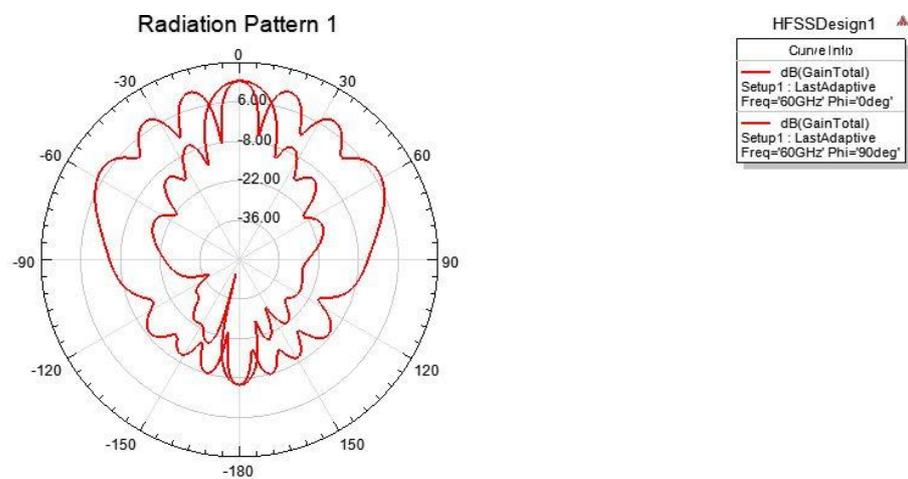


Рис. 4.29. 2-D Диаграмма направленности облучателя

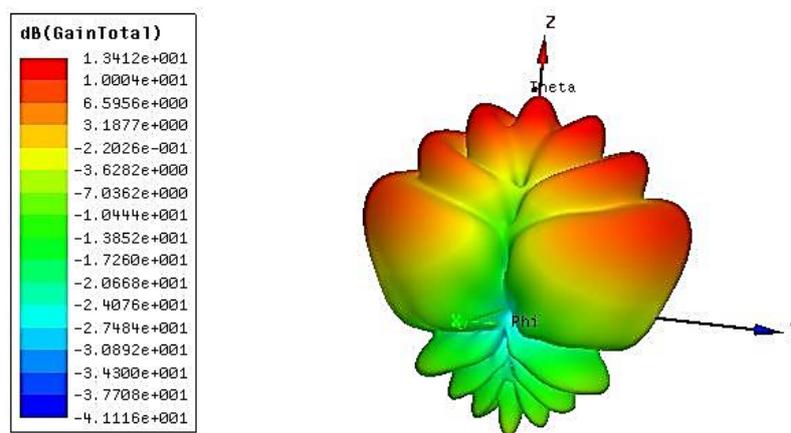


Рис. 4.30. 3-D Диаграмма направленности облучателя

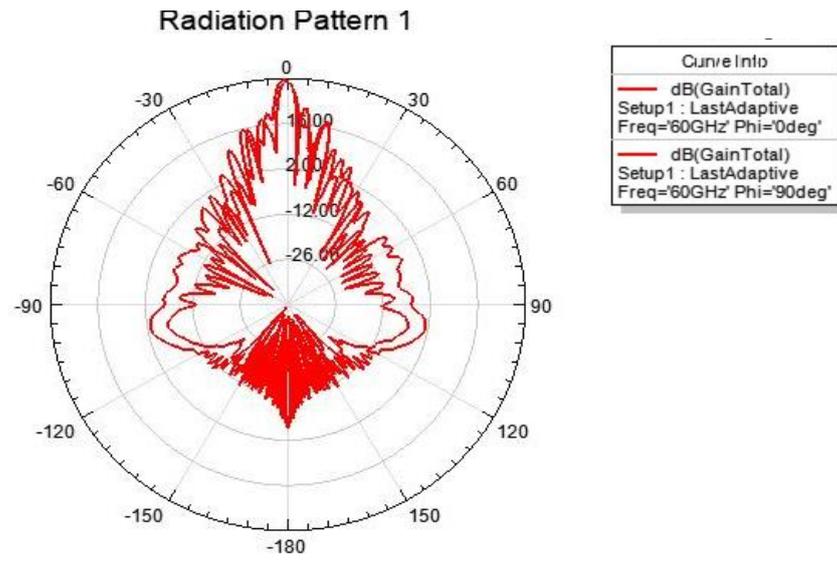


Рис. 4.31. 2-D Диаграмма направленности рефлектора заданной формы

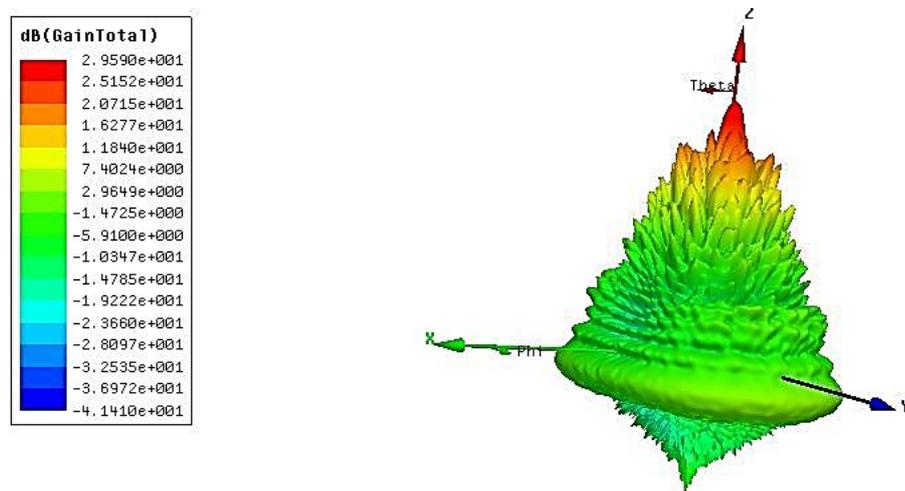


Рис. 4.32. 3-D Диаграмма направленности рефлектора заданной формы

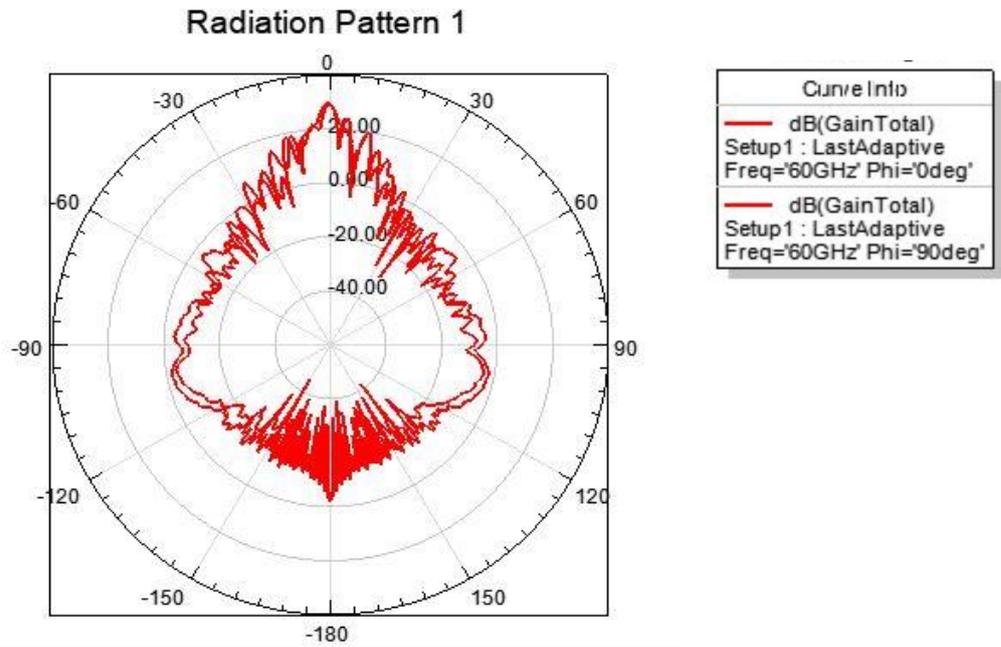


Рис. 4.33. 2-D Диаграмма направленности рефлектора с погрешностью 0,003 мм

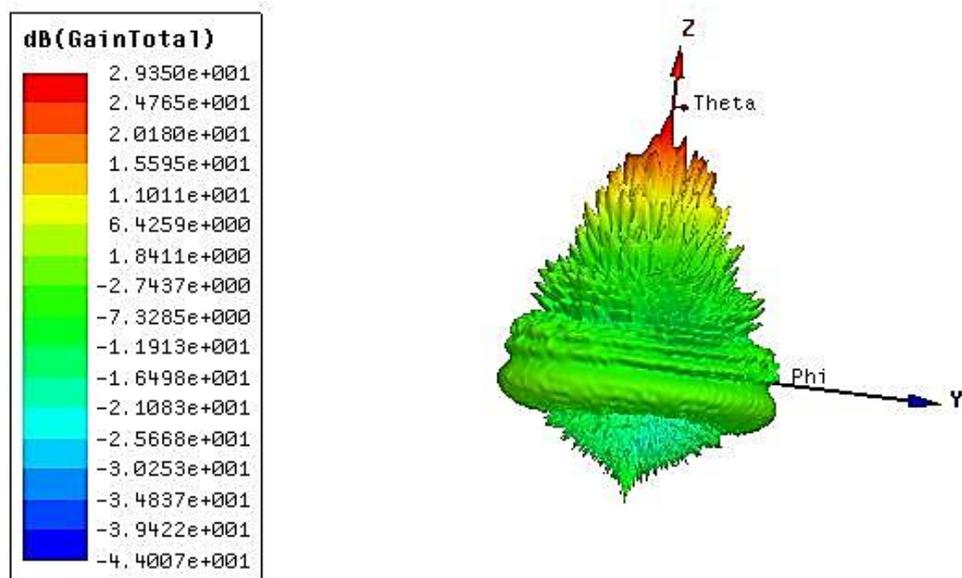


Рис. 4.34. 3-D Диаграмма направленности рефлектора с погрешностью 0,003мм

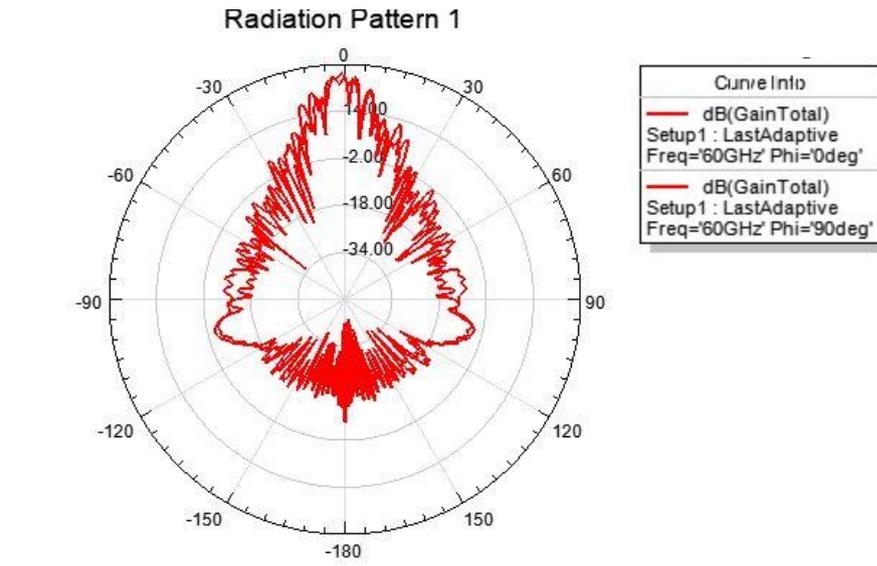


Рис. 4.35. 2-D Диаграмма направленности рефлектора с погрешностью 0,015мм

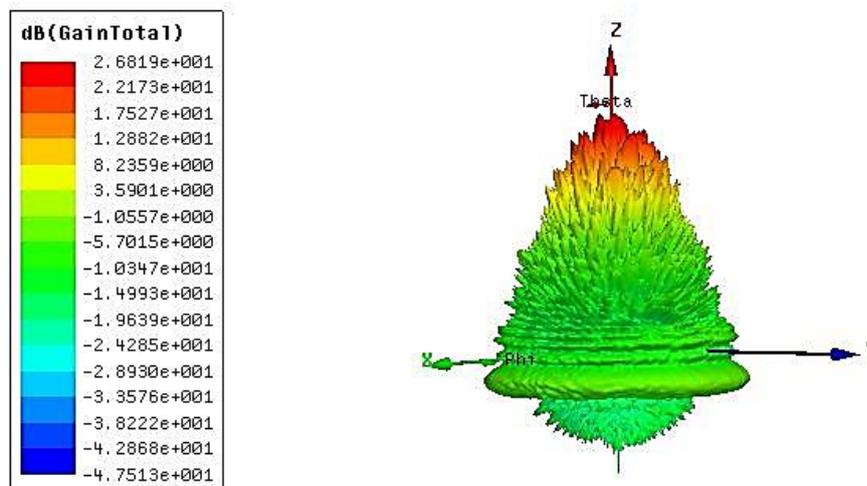


Рис. 4.36. 3-D Диаграмма направленности рефлектора с погрешностью 0,015 мм

Результаты проведенного анализа показали, что предлагаемая технология изготовления рефлектора зеркальной антенн ЛА методом вакуумной инфузии при использовании углеродной ткани марки Аспро А-80 и эпок-

сидного связующего марки Araldite LY 8615/XB 5173, позволяет получать углепластики с высокими механическими свойствами.

Таблица 4.13. – 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 увеличилась на 10,7%. Повышение прочности, вероятно, связано с низкой пористостью.

4.7. Выводы по 4 главе

1. В работе предложены математические модели, позволяющие описать кинетику процесса отверждения для двух различных моделей: с учетом и без учета тепловыделения.

2. В результате проведенных расчетов было установлено, что, заданная температура в 180°C устанавливается на 14240 сек (для моделей без учета тепловыделения) и за 9980 сек (для моделей с учетом тепловыделения). Расхождение теоретических и экспериментальных результатов составило 9%.

3. Разработанная модель процесса отверждения связующего с учетом тепловых эффектов, позволила определить температуру и продолжительность нагрева на каждом этапе отверждения. Установлено, что вариант №3 (скорость нагрева 5°C/мин) является оптимальным.

4. Значения пористости образцов-свидетелей, определенные с помощью компьютерного микротомографа марки Bruker Skyscan 1172 не превы-

шают 3%. Погрешность размеров при изготовлении (от теоретической формы) составила 3 мкм по толщине и 15 мкм по профилю, что удовлетворяет требованиям к диаграммам направленности. По сравнению с базовым вариантом прочность увеличивалась: - при растяжении на 8,8%, - при межслоевом сдвиге на 10,7%.

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% значения коэффициента проницаемости увеличивается 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 А60). Погрешность между экспериментальными и теоретическими результатами не превысила 3%.

4. Для рефлектора зеркальной космической антенны диаметром 1200 мм экспериментально определены рациональные схемы выкладки по критерию отсутствия складок. Для ткани заданного типа плетения и пори-

стости определены координаты критических точек, установлено минимальное расстояние между единичными элементами тканной структуры, и выбрана рациональная схема выкладки.

5. Разработаны математические модели, позволяющие описать кинетику процесса отверждения с учетом и без учета влияния экзотермических эффектов. Установлено, что заданная температура в 180°C достигается за 14240 сек (для моделей без учета тепловыделения) или за 9980 сек (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, и построены диаграммы направленности. Погрешности изготовленного рефлектора составили по толщине 3 мкм, по профилю 15 мкм, что полностью соответствует заданным техническим требованиям.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- a, b, h_1 – геометрические характеристики элементарной ячейки ткани, мм
- η – вязкость связующего, Па·с
- П – пористость ткани, %
- V – объем элементарной ячейки, мм³
- V_f – объем волокна в элементарной ячейке, мм³
- $V_{деф}$ – объем элементарной ячейки в деформированном состоянии, мм³
- α – сетевой угол, град
- $P_{нач}$ – начальная пористость ткани, %
- $P_{деф}$ – пористость ткани в деформированном состоянии, %
- P_{min} – минимальное значение пористости, %
- P_2 – второе критическое давление при капиллярном пропитывании волокон, Н/м²
- $K_{1,2}$ – значения коэффициента проницаемости, м²
- $K_{деф}$ и $K_{нач}$ – коэффициент проницаемости недеформированного и деформированного состояния, м²
- τ – время пропитывания, сек
- l – длина образца, мм²
- ρ_A – поверхностная плотность, кг/м²
- m – масса образца, кг
- ρ – плотность материала, кг/м³
- h_1 – толщина пакета, мм²
- R_1 – радиус фронта потока, мм
- R_0 – радиус подающей трубки, мм
- Δp – перепад давления, атм
- C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\frac{Дж}{кг \cdot град}$

k – коэффициент теплопроводности материала, $\frac{Вт}{м \cdot град}$

k_{xx}, k_{xz}, k_{zz} – теплопроводности анизотропного материала, $\frac{Вт}{м \cdot град}$

∇T – градиент температуры, град

h – минимальный размер конечно-элементной сетки, мм

α – степень отверждения, %

$\frac{d\alpha}{d\tau}$ – скорость реакции.

H – количество теплоты, выделяющее при данном режиме отверждения, Дж/г

A, E – предэкспоненциальный множитель и кажущаяся энергия активации, $S^{-1}, кДж/моль$

T – абсолютная температура, град

R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К

β – скорость нагрева, равная dT/dt .

l_1 – длина нити основы, мм

r_2 – расстояние между центрами утка, мм

A^α – максимальная горизонтальная проекция образца на опорную поверхность, мм

D^α – коэффициент драпируемости, %

CFRP – carbon fiber reinforced plastic

RFI – resin film infusion

RTM – resin transfer molding

VARI – vacuum assisted resin infusion

ВИ – вакуумная инфузия

ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия

ЗКА – зеркальные космические антенны

ЛА – летательный аппарат

КА – космический аппарат

КЛТР – коэффициент линейного термического расширения

КМ – композиционные материалы

КТ – космический телескоп

ПКМ – полимерные композиционные материалы

РКТ – ракетно-космическая техника

УВ – углеродное волокно

УП – углепластик

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексашин, В.М. Использование методов термического анализа для установления технологических параметров процессов отверждения клеящих систем / В.М. Алексашин, К.Е. Куцевич, Н.В. Антюфеева, А.П. Петрова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2015. – № 12. – С. 15–21.
2. Алифанов, О.М. Математическое моделирование высокопористых волокнистых материалов и определение их физических свойств / О.М. Алифанов, В.В. Черепанов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47. – № 3. – С. 463–472.
3. Алифанов, О.М. Определение температурных зависимостей теплофизических характеристик анизотропных материалов из решения обратной задачи / О.М. Алифанов, Н.А. Иванов, В.А. Колесников, А.Г. Меднов // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16. – № 5. – С. 32.
4. Армированные пластики. Под ред. Г.С. Головкина. – М.: МАИ, 1997. – 402 с.
5. Ахметова, Э.Ш. Оценка температуры стеклования эпоксидных связующих / Э.Ш. Ахметова, Г.В. Малышева // Сборник трудов Седьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – С. 396–397.
6. Баженов, С.Л. Полимерные композиционные материалы / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
7. Баурова, Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.

8. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности / Н.М. Беляев, А.Л. Рядно. – М.: Высшая школа, 1982. – 304 с.
9. Беляков, Е.В. Выбор режимов формования композитных конструкций ракетно-космической техники / Е.В. Беляков, В.А. Тарасов, Р.В. Боярская // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 5. – С.37–43.
10. Бодунов, Н.М. Исследования процесса изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением / Н.М. Бодунов, П.В. Бреховских, В.И. Халиулин // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2015. – Т. 71. – № 6. – С. 37–42.
11. Бойцов, Б.В. О совершенствовании процессов изготовления изделий сложной формы / Б.В. Бойцов, Ю.Ю. Комаров // Компетентность. – 2012. – № 4 (95). – С. 12–15.
12. Братухин, А.Г. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. – М.: Готика, 2003. – 516 с.
13. Васильев, В.В. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин – М.: Машиностроение, 1990, – 512 с.
14. Ветрова, Т.А. Основные понятия термического анализа Приборы ДСК, ТГ, ДТА, СТА Сравнение методов ДСК, ДТА и СТА / Т.А. Ветрова // Доклад на семинаре фирмы Netzsch-GerätebauGmbH (Германия) по современным методам термического анализа для исследования полимерных композиционных материалов и процессов отверждения, Москва, – 26 марта 2013г.
15. Воюцкий, С.С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых материалов дисперсиями полимеров / С.С. Воюцкий. – Л.: Химия, 1969. – 336 с.

16. Головкин, Г.С. Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов / Г.С. Головкин, В.П. Дмитриенко. – М.: Русаки, 2005. – 472 с.

17. Горбаткина, Ю.А. О некоторых параметрах, определяющих прочность границы раздела в системах полимер-волокно / Ю.А. Горбаткина // Клеи. Герметики. Технологии. – 2008. – № 10. – С. 17–19.

18. Горбаткина, Ю.А. Прочность эпоксидных стеклопластиков при сдвиге в широком диапазоне скоростей нагружения / Ю.А. Горбаткина, В.И. Солодилов, В.А. Сушенков // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2004. – Т. 46. – № 6. – С. 1–7.

19. Гузева, Т.А. Методы оценки свойств связующих, применяемых при производстве изделий из полимерных композиционных материалов / Т.А. Гузева // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 5. – С. 22–24.

20. Гузева, Т.А. Новые подходы к повышению эффективности производства деталей из органопластиков / Т.А. Гузева // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – №7. – С. 53–56.

21. Дементьева, Л.А. Композиционные материалы клеевые на основе стеклянных и углеродных наполнителей / Л.А. Дементьева, А.А. Сереженков, Л.И. Бочарова, Л.И. Аниховская, Н.Ф. Лукина // Клеи. Герметики. Технологии. – 2009. – №1. – С. 24–27.

22. Дементьева, Л.А. Свойства композиционных материалов на основе клеевых препрегов / Л.А. Дементьева, А.А. Сереженков, Л.И. Бочарова, Н.Ф. Лукина, К.Е. Куцевич, А.П. Петрова // Клеи. Герметики. Технологии. – 2012. – №6. – С. 19–24.

23. Дмитриев, О.С. Влияние типа наполнителя на оптимальные режимы отверждения толстостенных ПКМ / О.С. Дмитриев, В.Н. Кириллов, А.В. Зуев, А.А. Черепахина // Клей. Герметики. Технологии. – 2011. – №11. – С. 27–36.

24. Древаль, В.Е. Течение жидкокристаллических полимеров через цилиндрические каналы и волокнистые пористые материалы / В.Е. Древаль, Ф.Н. Хайретдинов, В.А. Литвинов, М.Л. Кербер, В.Г. Куличихин // Высокомолек. соед. Сер.А. – 1995. – Т.27. – №1. – С. 79–87.
25. Душин, М.И. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением / М.И. Душин, А.В. Хрульков, Р.Р. Мухаметов, Л.В. Чурсова // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №1. – С. 18–26.
26. Екатерина, П. Современные технологии производства композитных изделий от ESI Group / П. Екатерина // Наука и производство. – 2016. – С. 2–6
27. Емелина, А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия / А.Л. Емелина. – М: Лаборатория химического факультета, МГУ, 2009. – 42 с.
28. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
29. Игошин, Д.Е. Численное исследование зависимости проницаемости от пористости среды, образованной каналами регулярной структуры / Д.Е. Игошин, Р.С. Сабуров // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1. – № 1 (1). – С. 84 – 90.
30. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева, Предисл, А.С. Шадского. Изд. стереотип. – М.: Книжный дом «Либроком», 2014. – 272 с.
31. Карпейкин, И.С. Исследование прочности намоточных эпоксидных угле- и стеклопластиков при кручении, растяжении и поперечном изгибе / И.С. Карпейкин, М.В. Вайнберг // Механика полимеров. – 1978. – № 2. – С.219–225.

32. Кириенко, Т.А. Исследование реологических свойств клеевых связующих / Т.А. Кириенко, Н.Ф. Лукина, К.Е. Куцевич, А.П. Петрова // Клеи. Герметики. Технологии. – 2016. – №2. – С. 6–8.

33. Коган, Д.И. Технология изготовления ПКМ способом пропитки плёночным связующим / Д.И. Коган, Л.В. Чурсова, А.П. Петрова // Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. – №6. – С. 25–29.

34. Колпаков, И.М. Дифференциальная сканирующая калориметрия: метод, техника и применение для анализа композиционных материалов / И.М. Колпаков // Доклад на семинаре фирмы Netzsch-Gerätebau GmbH (Германия) по современным методам термического анализа для исследования полимерных композиционных материалов и процессов отверждения, Москва, – 26 марта 2013г.

35. Комков, М.А. Реологические свойства полимерных связующих, используемых при намотке изделий из композиционных материалов / М.А. Комков // Клеи. Герметики. Технологии. – 2012. – № 3. – С. 30–35.

36. Комаров, В.А. Исследование и модификация оснастки и формообразующей поверхности с целью повышения точности изготовления / В.А. Комаров, Е.И. Куркин, А.С. Кузнецов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – 6(3), – т.15. – С. 710–717.

37. Котомин, С.В. Пропитка волокнистых материалов вязкопластичными смесями полимеров / С.В. Котомин, С.В. Антонов, Г.В. Куличихин, М.Л. Кербер, В.Г. Куличихин // Высокомолек. соед. Сер.А. – 1998. – Т.40, № 7. – С. 1191–1197.

38. Литвинов, В.Б. Структурно-механические свойства высокопрочных углеродных волокон / В.Б. Литвинов, Л.П. Кобец, М.С. Токсанбаев, И.С. Деев, Л.М. Бучнев // Композиты и наноструктуры. – 2011. – №3. – С. 36–50.

39. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам: в 2-х т. / Дж. Любин, – М.: Машиностроение, 1988. – Т. 1. – 488 с.

40. Малкин, А.Я. Дилатансия и динамическое стеклование концентрированных суспензий: состояние проблемы / А.Я. Малкин, В.Г. Куличихин // Коллоидный журнал. – 2016. – Т.78. – С.3–10.

41. Малышева, Г.В. Оптимизация выбора параметров, характеризующих состояние объекта, при решении задач надежности/ Г.В. Малышева, И.К. Романова // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2015. – №6. – С. 33–38.

42. Малышева, Г.В. Оценка температур фазовых переходов полимерных связующих методом дифференциальной сканирующей калориметрии / Г.В. Малышева, Э.Ш. Ахметова, Ю.Ю. Шимица // Клеи. Герметики. Технологии. – 2014 г. – №6. – С. 37–41.

43. Малышева, Г.В. Оценка температуры стеклования эпоксидных связующих / Г.В. Малышева, Э.Ш. Ахметова, А.Н. Марычева // Физика и химия стекла. – 2014. – №3. – С. 30–33.

44. Малышева, Г.В. Оценка температуры стеклования эпоксидных связующих, модифицированных полисульфоном / Г.В. Малышева, Э.Ш. Ахметова, А.Н. Марычева // Физика и химия стекла. – 2014. – Т.40. – №5. – С. 718–724.

45. Малышева, Г.В. Методы оценки содержания полимерной матрицы в композиционном материале / Г.В. Малышева, И.Р. Сайфулин // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 1. – С. 2–5.

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

47. Маскет, М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 640 с.

48. Маунг, П.П. Исследование формообразующих свойств углеродных и стеклянных тканей / П.П. Маунг, М.С. Тумасова, Г.В. Малышева

// 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.

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

50. Маунг, П.П. Особенности процесса пропитывания при изготовлении деталей двойной кривизны из полимерных композиционных материалов / П.П. Маунг, А.Н. Марычева, Г.В. Малышева // 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.

51. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Издательство «Научные основы и технологии», 2010. – 822 с.

52. Михайлин, Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Издательство «Научные основы и технологии», 2011. – 720 с.

53. Михайловский, К.В. Прогнозирование температурных режимов процесса отверждения связующего при получении деталей из полимерных композиционных материалов с помощью микроволнового излучения / К.В. Михайловский, С.В. Резник // Тепловые процессы в технике. – 2014. – №8. – С. 363–368.

54. Михайловский, К.В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций / К.В. Михайловский, П.В. Просунцов, С.В. Резник // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №9(9). – С.33.

55. Михайловский, К.В. Разработка математико-алгоритмического обеспечения для расчета внутренних напряжений в тонкостенных рефлек-

торах из углепластика во время технологического процесса их изготовления / К.В. Михайловский, С.В. Резник // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 8. – С. 151–166.

56. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

57. Мишуров, К.С. Определение состава и плотности полимерных композиционных материалов в деталях и конструкциях неразрушающими методами / К.С. Мишуров, В.В. Мурашов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2015. – №10. – С. 16–21.

58. Мурашов, В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами / В.В. Мурашов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 465–475.

59. Мурашов, В.В. Определение пористости углепластиков в авиационных конструкциях ультразвуковым методом / В.В. Мурашов, К.С. Мишуров // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №2 (35). – С. 88–92.

60. Мурашов, В.В. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом / В.В. Мурашов, К.С. Мишуров // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №1 (34). – С. 81–85.

61. Мухаметов, Р.Р. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения / Р.Р. Мухаметов, К.Р. Ахмадива, М.А. Ким, А.Н. Бабин // В сб. Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ. – 2012. – С. 260–265.

62. Новиков, И.И. Прикладная термодинамика и теплопередача / И.И. Новиков, К.Д. Воскресенский. – М.: Высшая школа, 1961. – 208 с.

63. Полилов, А.Н. Критерии прочности полимерных волокнистых композитов, описывающие некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты / А.Н. Полилов, Н.А. Татусь // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2008. – № 3. – С. 103–110.

64. Просунцов, П.В. Проектные исследования рефлекторов зеркальных космических антенн с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью / П.В. Просунцов, А.В. Азаров // Матер. 6-го Белорусского космического конгресса (28-30 октября 2014 г., Минск). – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, – 2014. – Т. 1. С. 223-226.

65. Пье Пху Маунг Исследование влияния сетевого угла тканей на кинетику процесса пропитывания при формовании изделий из углепластика / Пье Пху Маунг, Г.В. Малышева, С.А. Гусев // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 5. – С. 2–6.

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

67. Пье Пху Маунг Определение технологических режимов процесса пропитывания поверхностей двойной кривизны / Пье Пху Маунг // В сборнике: XL Академические чтения по космонавтике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – С. 43–44.

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

69. Пье Пху Маунг Технологические обеспечения производства рефлектора космических зеркальных антенн из углепластиков / Пье Пху Маунг, Г.В. Малышева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2016. – № 5. – С. 38–47.

70. Рабинович, А.Л. Введение в механику армированных полимеров / А.Л. Рабинович. – М.: Наука, 1970. – 482 с.

71. Работнов, Ю.Н. Критерий межслойной прочности углепластиков при циклических нагрузках / Ю.Н. Работнов, В.П. Когаев, А.Н. Полилов, В.Б. Стрекалов // Механика композитных материалов. – 1982. – № 6. – С. 983–986.

72. Работнов, Ю.Н. Усталостная прочность однонаправленных углепластиков при растяжении под углом к направлению армирования / Ю.Н. Работнов, В.П. Когаев, А.Н. Полилов, В.Б. Стрекалов, А.М. Думанский А.М. // Механика композитных материалов. – 1985. – №1. – С. 44–47.

73. Рапохина, С.С. Управление реологическим поведением пропитываемого пучка волокон в процессе пултрузии / С.С. Рапохина, А.Н. Муранов, К.В. Михайловский, Б.И. Семенов // Инженерный вестник. – 2013. – №11. – С.57–66.

74. Резник, С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических конструкций / С.В. Резник // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – №3(15). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-638.

75. Резник, С.В. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью / С.В. Резник // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т.88. – №3. – С. 674–680.

76. Резник, С.В. Теоретические основы определения продольной теплопроводности тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов / С.В. Резник, В.П. Тимошенко, П.В. Просунцов, Л.В. Миаль // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т.87. – №4. – С. 838–844.

77. Резник, С.В. Основные подходы к формированию программы термовакуумных испытаний прецизионных рефлекторов зеркальных космических антенн / С.В. Резник, О.В. Денисов, И.В. Чуднов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. н.э. Баумана. – 2013. – №8. – С. 167–184.

78. Самарский, А.А. Математическое моделирование / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Наука, 1986. – 296 с.

79. Себеси, Г. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы / Г. Себеси, П. Бредшоу. – М.: Мир, 1987. – 592 с.

80. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

81. Семенов, Б.И. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии / Б.И. Семенов, К.М. Куштар. Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 223 с.

82. Семенов, Б.И. Управление формированием микроструктуры и свойств стержневых элементов УУКМ (УККМ) при изготовлении методом пултрузии промышленной нити / Б.И. Семенов, К.В. Михайловский, С.С. Рапохина, А.М. Седых // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – №7. – С. 13–20.

83. Сорокин, А.Г. Теоретическое моделирование коэффициента проницаемости при фильтрации несжимаемых жидкостей / А.Г. Сорокин // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2012. – № 6. – С. 47–54.

84. Стренг, Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М.: Мир, 1977. – 349 с.

85. Тараскин, Н.Ю. Особенности методики исследования свойств полимерных композиционных материалов методом динамомеханического анализа / Н.Ю. Тараскин, Е.К. Филина, Г.В. Малышева // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – №7. – С. 9–13.

86. Татарников, О.В. Конечно-элементное моделирование теплового режима автоклавного отверждения трехслойной панели / О.В. Татарников, Г.В. Малышева, Э.Ш. Ахметова, Б.Б. Морозов // Клеи. Герметики, Технологии. – 2015. – № 8. – С. 32–35.

87. Теория термического анализа: Физико-химические свойства твердых неорганических веществ / Пер. с англ. под ред. Я.К. Шестака. – М.: Мир, 1987. – 456 с.

88. Технические свойства полимерных материалов: Уч.-справ. Пос. / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 240 с.

89. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении // Научные редакторы А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. – М.: Готика, 2003. – 516 с.
90. Торнер, Р.В. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета) / Р.В. Торнер. – М.: Химия, 1972. – 454 с.
91. Трофимов, Н.Н. Основы создания полимерных композитов / Н.Н. Трофимов, М.З. Канович. – М.: Наука, 1999. – 540 с.
92. Ушаков, А.Е. Оценка проницаемости заготовок из сухого наполнителя, предназначенных для изготовления панелей вакуумной инфузией / А.Е. Ушаков, Ю.Г. Кленин, Т.Г. Сорина, Е.И. Корниенко, А.А. Сафонов // Композиты и наноструктуры. – 2013. – № 1 (17). – С. 46–56.
93. Чебышев, И.Л. О кройке одежды. Полное собрание сочинений. Т.5 / И.Л. Чебышев. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 170 с.
94. Шестопалова, Л.П. Методы исследования микро- и наноструктуры материалов / Л.П. Шестопалова, Л.Г. Петрова, В.А. Александров. – М.: МАДИ, 2012. – 184 с.
95. Шестопалова, Л.П. Современные методы исследования структуры и фазового состава упрочненных слоев после химико-термической обработки / Л.П. Шестопалова, Л.Г. Петрова, А.Ю. Малахов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №1 (97). – С. 29–37.
96. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. – М.: Мир, 1988. – 544 с.
97. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм, под ред. Чл.-корр. РАН проф. В.Г. Куличихина. – М.: Колосс, 2003. – 312 с.
98. Ahn, K.J. Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements / K.J. Ahn, J.C. Seferis // Polymer Composites. – 1991. – Vol. 12 (3). – P. 146–152.

99. Belov, E. Modelling of permeability of textile reinforcements: Lattice Boltzmann method / E. Belov, S. Lomov, I. Verpoest, T. Peeters, D. Roose // *Composites Science and Technology*. – 2004. – Vol. 64. – P. 1069–1080.

100. Bogetti, T.A. Two-Dimensional Cure Simulation of Thick Thermosetting Composites / T.A. Bogetti, J.W. Gillespie // *Journal of Composite materials*. – 1991. – Vol. 25. – P. 239–273.

101. Carman, P.C. Fluid flow through granular beds / P.C. Carman // *Trans Inst chemical engineers*. – 1937. – No. 15. – P. 150–66.

102. Carter, EJ. A simplified model to calculate the permeability tensor of an anisotropic fiber bed // EJ. Carter, AW. Fell, J. Summerscales // *Composite manufacturing*. – 1995. – No. 6. – P. 228–233.

103. Chan, AW. Anisotropic in plane permeability of fabric media / AW. Chan, ST. Hwang // *Polymer engineering science*. – 1991. – No. 31(6). – P. 1233–1239.

104. Costa, M.L. Monitoring of cure kinetic prepreg and cure cycle modelling / M.L. Costa, E.C. Botelho, M.C. Rezende // *Journal of material science*. – 2006. – Vol. 41. – P. 4349–4356.

105. Delerue, J. Network modelling of permeability for textile reinforcements / J. Delerue, S. Lomov, R. Parnas, I. Verpoest, M. Wevers // *Polymer composites*. – 2003. – Vol. 24(3). – P. 344–357.

106. Endruweit, A. The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model / A. Endruweit, P. Ermanni // *Composites Part A*. – 2004. – Vol. 35. – P. 439–451.

107. Flores, J. D. Chemical characterization and two-step cure kinetics of a high-performance epoxy adhesive system: M.Sc. Thesis / J. D. Flores. Department of Chemistry, Wichita State University, Wichita, 2006. – 123 p.

108. Heardman, E. In plane permeability of sheared fabrics / E. Heardman, C. Lekakou, M. Bader // *Composites. Part A. Applied Science and Manufacturing*. – 2001. – Vol. 32. – No.7. – P. 933–940.

109. Hickey, C.M.D. Cure kinetics and rheology characterisation and modelling of ambient temperature curing epoxy resins for resin infusion, VARTM and wet layup applications / C.M.D. Hickey, S. Bickerton // *Journal of materials science*. – 2013. – No. 48. – P. 690–701.

110. Hossein, G. Physical determination of permeability variation with porosity for composite performs / G. Hossein // *IUST International Journal of Engineering Science (Industrial & Mechanical Engineering Special Issue)*. – 2007. – Vol. 18. – No. 3-4. – P. 67–73.

111. Hubert, P. Cure kinetics and viscosity models for Hexcel 8552 epoxy resin / P. Hubert, A. Johnston, A. Poursartip, K. Nelson // *Proc. Int. SAMPE Symposium and Exhibition, Long Beach, CA*. – 2001. – Vol. 46. – P. 2341–2354.

112. Irekt, A. Rheological study of composite materials based on thermosetting matrix and fillers mineral / A. Irekt, B. Bezzazi // *Key engineering materials*. – 2013. – Vol. 550. – P. 79–84.

113. Lai, C. Model resin permeation of fiber reinforcements after Shear Deformation / C. Lai, W. Young // *Polymer Composites*. – 1997. – Vol. 18(5). – P. 642–648.

114. Laine, B. Permeability of the woven fabrics / B. Laine, G. Hivet, P. Boisse, F. Boust, S. Lomov, P. Badel // *Proceedings of the 8th international conference on flow processes in composite materials. Ecole des Mines de Douai, France*. – 2006. – P. 39–46.

115. Lee, W.I. Heat of reaction, degree of cure, and viscosity of hercules 3501-6 resin / W.I. Lee, A.C. Los, G.S. Springer // *Journal of composite materials*. – 1982. – Vol. 15. – P. 510–520.

116. Li, M. Optimal Curing for Thermoset Matrix Composites: Thermochemical Considerations / M. Li, Q. Zhu, P.H. Geubelle, C.L. Tucker // *Polymer Composites*. – 2001. – Vol. 22, – P. 118–131.

117. Li, W. Curing behavior and rheology properties of alkyl-imidazolium-treated rectorite/epoxy nanocomposites / W. Li, L. Hou,

Q. Zhou, L. Yan, L.S. Loo // *Polymer engineering & science.* – 2013. – Vol. 53(11). – P. 2470–2477.

118. Lomov, S. Model of shear of woven fabric and parametric description of shear resistance of glass woven reinforcements / S. Lomov, I. Verpoest // *Composites science and technology.* – 2006. – Vol. 66 (7-8). – P. 919–933.

119. Lomov, S. Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate / S. Lomov, I. Verpoest, T. Peeters, D. Roose, M. Zako // *Composites science and technology.* – 2002. – Vol. 63 (7). – P. 993–1007.

120. Loos, A. Curing of epoxy matrix composites / A. Loos, G. Springer // *Journal of composite materials. Journal of Composite Materials.* – 1983. – Vol. 17. – No. 2, – P. 135–169.

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

122. Mantell, S. C. Cure Kinetics and rheology models for ICI fiberite 977-3 and 977-2 thermosetting resins / S. C. Mantell, P.R. Ciriscioli, G. Almen // *Journal of reinforced plastics and composites.* – 1995. – Vol. 14. – No. 8. – P. 847–865.

123. Neeraj, Rai Optical cure cycle for the fabrication of thermosetting-matrix composites / Neeraj Rai, Ranga Pitchumani // *Polymer composite.* – 1997. – Vol. 18. – No. 4. – P. 566–581

124. Nordlund, M. Numerical study of the local permeability of non-crimp fabrics / M. Nordlund, T.S. Lundstrom // *Journal of composite materials.* – 2005. – Vol. 39(10). – P. 929–947.

125. Phelan, Jr.F. Simulation of the injection process in resin transfer molding / Jr. F. Phelan // *Polymer composite.* – 1997. – No. 18. – Vol. 4. – P. 460–476.

126. Phelan, Jr.F. Analysis of transverse flow in aligned fibrous porous media / Jr.F. Phelan, G. Wise // *Composites part A.* – 1996. – Vol. 27A. – P. 25–34.

127. Prosuntsov, P.V. Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication / P.V. Prosuntsov, S.V. Reznik, K.V. Mikhailovsky,

A.D. Novikov // IOP Journal. Conference series. Proceedings of the 4-th International conference on advanced composites and materials technologies for arduous applications. – 5-6 November 2015. Wrexham Wales, United Kingdom.

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

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

130. Reznik, S.V. Modelling of the temperature and stressed-strained states of the reflector of a mirror space antenna / S.V. Reznik, P.V. Prosuntsov, A.V. Azarov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – T. 88. – No 6. – P. 978–983.

131. Reznik, S.V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length / S.V. Reznik, P.V. Prosuntsov, A.V. Azarov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – T. 88. – No. 3. – P. 699–705.

132. Reznik, S.V. Advanced directions of research in the field of composite structures for space antennas / S.V. Reznik // Proc. 3-rd Int. Conf. on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications (May 13-16, 2013, Wrexham, Nord Wales, UK). – P. 7–11.

133. Reznik, S. Thermal vacuum tests of the lightweight reflector for a space antenna / S. Reznik, P. Prosuntsov, V. Timoshenko, O. Denisov, D. Minakov, K. Mikhailovsky // Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on Antennas and RF Systems for Space Science (5-9 October 2015, Noordwijk, The Netherlands). ESA/ESTEC. – 6 p.

134. Reznik, S. Design study of a lightweight reflector for the space antenna / S. Reznik, P. Prosuntsov, A. Azarov // Proc. 36-rd ESA Antenna Workshop on

Antennas and RF Systems for Space Science (5-9 October 2015, Noordwijk, The Netherlands). ESA/ESTEC. – 1 p.

135. Reznik, S.V. Comparative analysis of the honeycomb and thin-shell space antenna reflectors / S.V. Reznik, A.D. Novikov // MATEC Web of Conferences 01012 (2017) Thermophysical Basis of Energy Technologies. – 2016. DOI: 10.1051/mateconf/2017920101292. –5 p.

136. Ricky, Hardis Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin for thick composite structures: Master thesis / Ricky Hardis, Iowa State University. Iowa. United State, 2012. – 54 p.

137. Robitaille, F. Predictive modelling of processing and performance properties of textile composite unit cells: current status and perspectives / F. Robitaille, A. Long, M. Sherburn, C. Wong, C. Rudd // Proceedings ECCM-11. – 2004. cd-edition.

138. Sabbadini, M. The Antenna Design Framework: A New Way to Antenna Design / M. Sabbadini, B. Casali, M. Spallaccini // Proceedings of the 3rd European Workshop on Electromagnetic Compatibility and Computational Electromagnetics. October. – 1993. – P. 185–189.

139. Spencer, D.J. Knitting Technology 3rd Edition / D.J. Spencer. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2001. – 416 p.

140. Takano, N. Microstructure-based evaluation of the influence of woven architecture on permeability by asymptotic homogenisation theory / N. Takano, M. Zako, T. Okazaki, K. Terada // Composites science and technology. – 2002. – Vol. 62. – P. 1347–1356.

141. Van der Weeen, F. Algorithms for draping fabrics on doubly curved surfaces / F. Van der Weeen // International journal for numerical methods in engineering. – 1991. – No. 31, – P. 1415–1429.

142. Verleye, B. Computation of permeability of textile with experimental validation for monofilament and non-crimp fabrics / B. Verleye, M. Klitz, R. Croce, D. Roose, S. Lomov, I. Verpoest // Computational textiles. Springer. – 2007. – Vol. 55. – P. 93–110.

143. Verleye, B. Permeability of textile reinforcements: Simulation; influence of shear and validation conditions / B. Verleye, R. Croce, M. Griebel, M. Klitz, S.V. Lomov, G. Morren, H. Sol, I. Verpoest and D. Roose // Composite science and technology. – 2008. – Vol. 68. – P. 2804–2810.

144. Verpoest, I. Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro- mechanical, permeability and structural analysis / I. Verpoest, S. V. Lomov // Composites science and technology. – 2005. – Vol. 65. (15-16). – P. 2563–2574.

145. Wong, C. Comparisons of novel and efficient approaches for permeability prediction based on the fabric architecture / C. Wong, A. Long, M. Sherburna, F. Robitaille, P. Harrison, C. Rudd // Composites part A. – 2006. – Vol. 37 (6). – P. 847–857.

146. Yousefi, A. Kinetic studies of thermoset cure reactions / A. Yousefi, P.G. Lafleur, R. Gauvin // Polymer composites. – 1997. – Vol. 18. – No. 2. – P. 157–168.

147. Zhang, J. Effect of cure cycle on temperature/degree of cure field and hardness for epoxy resin / J. Zhang, Y.C. Xu, P. Huang //E-Polymer. – 2009. – Vol. 9. – P. 534–541.

148. Zhuofeng, Liu Rheological behaviours and processing windows of low viscosity epoxy resin for VIMP / Zhuofeng Liu, Jingcheng, Zeng, Jiayu, Xiao, Dazh, I. Jiang, Chaoyi. //Journal of Wuhan university of technology-mater. sci. ed. – 2011. – Vol. 26. – No. 5. – P. 931–934.

149. URL: http://samaro.fr/pdf/FT/Araldite_FT_LY_8615_Aradur_8615_Hardener_XB5173_EN.pdf (дата обращения 25 августа 2016)

150. URL: <http://wissrech.iam.uni-bonn.de/research/projects/NaSt3DGP> (дата обращения 10 февраля 2016)

151. URL: <http://www.asprotec.ru/product/> (дата обращения 05 апреля 2016)

152. URL: <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/> (дата обращения 14 июля 2015)

153. URL: <http://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/subsystems/reflector-antennas/> (дата обращения 20 марта 2016)