

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Неразрушающего Контроля
Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
Кафедра Физических методов и приборов контроля качества

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Термоволновой контроль изделий авиакосмической техники

УДК 620.179.1:629.78

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Разумова Анастасия Андреевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий инженер лаб. №34 НИ ТПУ	Ширяев В. В.	канд. тех. наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	канд. тех. наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржиков А.П.	д-р физ.-мат. наук		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P1	Способность совершенствовать и повышать свой интеллектуальный и общекультурный уровень и специальные знания в области математических, естественных, гуманитарных и экономических наук в комплексной инженерной деятельности на основе целостной системы научных знаний об окружающем мире;	Требования ФГОС (ОК-1) Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Способность адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности в понимании сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области.	Требования ФГОС (ОК-1,2, ПК-19) Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом; эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства отдельными группами исполнителей; в том числе над междисциплинарными проектами, уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2, ПК-12,13,16-18,12,22) Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности в областях контроля качества продукции предприятий измерительной техники и точного приборостроения; приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности умения непосредственно не связанных со сферой деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2, ОПК-2, ПК-10,19) Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Умение использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, основы теоретического и экспериментального исследования в комплексной инженерной деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя стандартные пакеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении..	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-5-7), Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Умение профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические процессы с использованием гибких САПР и оценивать их экономическую эффективность и инновационные риски при их внедрении.	Требования ФГОС (ОПК-3, ПК-5,6,8,20), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Способность проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-5,10,13,22), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P8	Умение разрабатывать методики проведения теоретических и экспериментальных исследований по анализу, синтезу и оптимизации методов измерения контроля и диагностики, используемых в приборостроении; способность разработать и проводить оптимизацию натуральных экспериментальных исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно-исследовательской деятельности и пользоваться правами на объекты интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ОК-1,ПК-7,14,15) ПК-2,26,27,28) Критерий 5 АИОР (п.2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Умение организовывать современное метрологическое обеспечение технологических процессов производства приборных систем и разрабатывать новые методы контроля качества выпускаемой продукции и технологических процессов; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.	Требования ФГОС (ОК-2, ПК-2,6,14,20) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Способность проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.	Требования ФГОС (ОК-1,2, ОПК-2, ПК-1,2,6,13) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Способность формулировать цели, определять задачи, выбирать методы исследования в области приборостроения на основе подбора и изучения литературных и патентных и других источников; разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию на объекты приборостроения, а также осуществлять системные мероприятия по реализации разработанных проектов и программ; составлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам исследовательской деятельности	Требования ФГОС (ОПК-1,3, ПК-3,4,9,11) Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Неразрушающего Контроля
Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
Кафедра Физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ А. П. Суржиков
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5Б	Разумовой Анастасии Андреевне

Тема работы:

Термоволновой контроль изделий авиакосмической техники

Утверждена приказом директора (дата, номер)

15.12.2015 №9728/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2017

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Изготовить: образец с дефектами на различной глубине, выполнить из десяти стеклопластиковых пластин толщиной 0,8 мм. Высота пластин 120 мм, длина 170 мм, общая толщина образца 8,2 мм. Использовать эпоксидный клей. Дефект шириной и длиной 10 мм. Рассчитать математическую модель образца программой ThermoCalc-3D.

Применить: тепловизор NEC, управляемые оптические нагреватели – светодиодные мощностью 1кВт и галогенные мощностью 2 кВт. Программы ThermoFit Pro, ThermoCalc-3D, MaskGenerator.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Анализ состояния активного теплового неразрушающего контроля при периодическом нагреве. 2. Экспериментальная работа по применению периодического нагрева.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация в Microsoft Office PowerPoint 2007
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич
Социальная ответственность	Анищенко Юлия Владимировна
Раздел на иностранном языке	Прохорец Елена Константиновна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Композитные материалы/ Verbundwerkstoffe	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий инженер лаб.34 ИНК ТПУ	Ширяев В.В.	канд.тех.наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Разумова А. А.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5Б	Разумовой Анастасии Андреевне

Институт	Институт неразрушающего контроля	Кафедра	Физических методов и приборов контроля качества
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.01 Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Финансовые ресурсы: 1776 руб. Человеческие ресурсы: 2 чел. Работа с информацией, представленной в научных публикациях, аналитических материалах, изданиях, нормативно-правовых документах, проведение исследований.
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка перспективности проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.	1. FAST-анализ.
---	-----------------

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко Валентин Сергеевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Разумова Анастасия Андреевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5Б	Разумовой Анастасии Андреевне

Институт	Институт неразрушающего контроля	Кафедра	Физических методов и приборов контроля качества
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.01 Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: методика Рабочая зона: лаборатория, компьютер, источники теплового нагрева, блок питания, тепловизор, мебель (шкаф, стулья, столы). Область применения: производственная среда
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1 Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 1.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – Механические опасности (источники, средства защиты); – Термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)	Анализ выявленных вредных факторов таких, как: – Недостаточная освещенность рабочей зоны. – Отклонение показателей микроклимата: – ненормированная температура или влажности воздуха помещения. – Повышенный уровень электромагнитных излучений. Анализ выявленных опасных факторов: – Электрический ток; – Пожар.
2. Экологическая безопасность: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на	Анализ воздействия на литосферу: образование отходов при поломке или утилизации компьютера, тепловизора, источников теплового излучения.

гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	Анализ возможных ЧС (пожар) и мер по защите в ЧС.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	Требования к организации оборудования рабочих мест с ПЭВМ регулируется СанПиН2.2.2/2.4.1340-03.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	канд.тех.наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Разумова Анастасия Андреевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 134 с., 96 рис., 20 табл., 39 источников, 3 прил.

Ключевые слова: активный тепловой неразрушающий контроль, тепловой периодический нагрев, термограмма, последовательность термограмм, методы обработки термограмм, композитные материалы.

Объектом исследования являются изделия авиакосмической техники из композитных материалов.

Цель работы – исследование возможности активного теплового неразрушающего контроля (АТНК) больших областей объекта обследования с помощью тепловизионных средств, а так же повышение производительности данного вида контроля.

В процессе исследования проводился АТНК композитных материалов с применением периодического нагрева (тепловых волн) с целью определения выявляемости дефектных структур (SNR) на различном расстоянии между источником нагрева и объектом контроля.

В результате исследования было определено, что при использовании периодического нагрева достоверность выявляемости дефектов производится на больших расстояниях по сравнению с однократным нагревом.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: объект контроля – образец с дефектом, выполненный из десяти стеклопластиковых пластин толщиной 0,8 мм каждая.

Степень внедрения: лабораторные исследования.

Область применения: авиакосмическая промышленность.

Экономическая эффективность/значимость работы: стадия научного исследования.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

композитный материал: Неоднородный сплошной материал, созданный искусственно и состоящий из нескольких компонентов с хорошо различимой границей раздела между ними.

активный тепловой неразрушающий контроль (АТНК): Контроль материалов и изделий путем анализа изменения температурных полей или тепловых потоков с использованием дополнительных источников теплового нагрева объекта контроля.

термоволновой контроль (тепловой контроль с периодическим нагревом): Контроль материалов и изделий путем анализа изменения температурных полей или тепловых потоков с использованием источников теплового периодического нагрева объекта контроля.

термограмма: Тепловое изображение, которое показывает распределение температуры или тепловых потоков по поверхности изделия.

последовательность термограмм: Тепловые изображения одной и той же поверхности изделия, зарегистрированные в разные моменты времени, как правило, с постоянным шагом.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

L_x – длина объекта контроля, мм;

L_y – высота объекта контроля, мм;

D – толщина объекта контроля, мм;

L – расстояние между тепловым дефектоскопом и объектом контроля, мм;

ΔT – температурный сигнал, К;

АТНК – активный тепловой неразрушающий контроль;

ОК – объект контроля;

ИК – инфракрасное, например, ИК-изображение;

ПК – персональный компьютер;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

МП – магнитное поле;

ПДУ – предельно допустимый уровень.

Оглавление

Введение	16
1 Теоретические основы	18
1.1 Применение композитных материалов в авиастроении	18
1.2 Композитные материалы	23
1.3 Методы теплового неразрушающего контроля	26
2 Методы обработки термограмм в программе ThermoFit Pro	32
3 Аппаратура активного теплового неразрушающего контроля	34
3.1 Источники теплового нагрева	34
3.2 Приемники теплового излучения	37
3.3 Тепловые дефектоскопы	40
4 Экспериментальные исследования	45
4.1 Обнаружение дефектов в объекте контроля при различных источниках нагрева	45
4.2 Обнаружение дефектов в объекте контроля при периодическом нагреве и однократном нагреве	49
4.3 Определение зависимости теплового сигнала от расстояния между источником нагрева и объектом контроля при различных параметрах эксперимента	56
4.4 Определение дефектов при разнообразной окраске поверхности контроля и на различном расстоянии между ОК и дефектоскопом	71
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	79
5.1 FAST-анализ	79
6 Социальная ответственность	88
6.1 Производственная безопасность	89
6.1.1 Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	89

6.1.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	94
6.2 Экологическая безопасность	96
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	97
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	100
Заключение	102
Список публикаций студента	103
Список используемых источников	106
Приложение А	112
Приложение Б	115
Приложение В	119

Введение

С развитием авиастроения существует прямая связь создания и производства нового поколения материалов. К таковым относятся композитные материалы, которые с 1960-х годов активно находят применение в авиакосмической технике. Они обладают разнородными свойствами, например, высокой удельной прочностью и жесткостью, жаропрочностью, износостойкостью, хорошими теплозащитными свойствами. Благодаря появлению и применению композитных материалов в авиакосмической технике существует возможность уменьшения массы конструкций, увеличения мощности двигателей, повышения весовой эффективности авиационно-космических аппаратов. А так же данные материалы позволяют снизить подверженность коррозии конструкций самолётов.

В композитных материалах чаще всего можно наблюдать такие дефекты, как пустоты, трещины, водный конденсат, расслоения между слоями материала, непроклеи, переливы связующего вещества между волокнами или слоями. Исследователям важно знать, где расположен дефект, его параметры, их связь с ресурсом материала для определенных научных работ.

Для обнаружения дефектов в композитных материалах используют различные методы неразрушающего контроля. Каждый из них имеет свои недостатки. Наиболее известными считаются следующие методы: визуальный, капиллярный, магнитный, ультразвуковой, тепловой, рентгеновский и радиоволновой.

С помощью визуального метода неразрушающего контроля невозможно определить наличие дефектов внутри материала. Капиллярный метод так же не позволит обнаружить дефекты, которые находятся под поверхностным слоем материала. Магнитный метод не применяется для обнаружения дефектов в композитных материалах. Ультразвуковой метод не является лучшим методом для обнаружения дефектов в материале потому, как для проведения данного

контроля необходим контакт с объектом контроля, так же необходимо применение контактной жидкости, не выгодно использование на больших площадях. Рентгеновский метод требует высоких трудозатрат, а так же является небезопасным для жизни человека. Радиоволновой метод можно применять для обнаружения дефектов, но на сегодняшний день он не является достаточно изученным. Тепловой метод неразрушающего контроля является оптимальным методом, т.к. он позволяет узнать сам факт нарушения сплошности.

Цель данной работы – исследование возможности активного теплового неразрушающего контроля (АТНК) больших областей объекта обследования с помощью тепловизионных средств с применением оптического нагрева, а так же повышение производительности данного вида контроля.

Важной проблемой данной работы является подбор необходимых параметров для исследования объектов контроля, т.е. необходимо выбрать источник нагрева, его мощность и оптимальное расстояние для получения картины дефектов на максимально большом участке объекта.

Объектом исследования являются изделия авиакосмической техники из композитных материалов. Предмет исследования – особенности периодического нагрева для контроля больших площадей.

1 Теоретические основы

1.1 Применение композитных материалов в авиастроении

Композитные материалы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности с 1960-х годов. Наиболее интересная – авиация. На сегодняшний день российская авиапромышленность активно внедряет композитные материалы в создание лётной техники. Благодаря свойствам данных материалов существует возможность уменьшения массы самолётов и подверженности коррозии, увеличения прочности деталей, сокращения количества деталей. В двигатели самолётов так же научились внедрять композитные материалы, что так же уменьшает их массу и, следовательно, позволяет экономить топливо. В сравнении с металлическими изделиями композитные имеют вес не больше 20 % от аналогичных, например, из алюминия, при этом превосходят по прочности, гибкости, коррозионостойкости и устойчивости к давлению. Так же композитные материалы более экологичны, в сравнении с металлами и не требуют особенного ухода.

Наиболее популярными композитными материалами в авиастроении являются стеклопластики и углепластики. В 30-х годах прошлого века во внимание самолётостроителей попал стеклопластик. Его начали успешно применять для пространственных кондукторов, стапелей и других технологических приспособлений, которые необходимы для качественной сборки сложных крупноразмерных деталей самолётов. Во времена Второй мировой войны начали изготавливать стеклопластиковые обтекатели, которые позволили снизить вес бомбардировщика Douglas A-20 (рис. 1). В 1944 году в США начали проводить аэродинамические испытания стеклопластиковых фюзеляжей и композитных крыльев для тренировочных самолётов AT-6 (рис. 2) и BT-15 (рис. 3) [1].

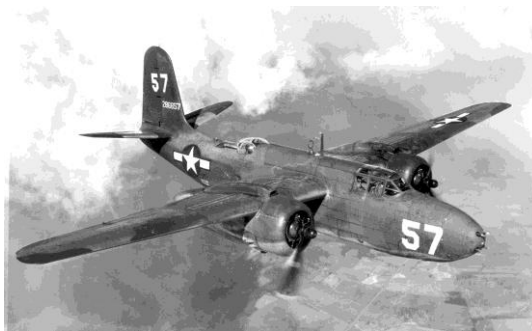


Рисунок 1 – Бомбардировщик Douglas A-20



Рисунок 2 – Тренировочный самолёт AT-6



Рисунок 3 – Тренировочный самолёт BT-15

В середине 50-х годов в США началось изучение новых композитных материалов. Стали производить борные и углеродные волокна. И уже в 1967 году был произведен полёт самолёта, планер которого целиком был изготовлен из композитного материала (рис. 4).



Рисунок 4 – Самолет Windecker Eagle

Через 20 лет появился углепластиковый планер, затем стали внедрять боропластики и всё с большим энтузиазмом композитные материалы находили применение в авиации и позволили поднять самолётостроение на новый уровень.

В авиастроении композитные материалы необходимы для создания высоконагруженных деталей, например, таких, как обшивка, панели, а так же для производства двигателей.

В качестве примера внедрения композитных материалов в авиацию можно рассмотреть самолёт A310. Его ранние модели в своем составе имели 5-6 % стекловолоконных материалов, а в 1986 году было добавлено оперение из углепластиков, а так же тормоза колёс начали производить из углеродных волокон. Самолёт A350 (рис. 5) имеет в своем составе 52 % от веса – композитные материалы, 20 % – алюминий, 14 % – титан, 7 % – сталь, 7 % – остальные. Самолёт B787 Dreamliner (рис. 6) на 50 % состоит из композитных материалов, на 20 % приходятся детали из алюминия, на 15 % из титана, 10 % отведено на стальные детали и 5 % на остальные [1].



Рисунок 5 – Airbus A-350



Рисунок 6 – Boeing 787 Dreamliner

На рисунках 5 и 6 достаточно хорошо виден изгиб крыльев, который способствует улучшению аэродинамических свойств. Это было получено благодаря применению композитных материалов и гибкости деталей.

В составе малых самолётов 65 % занимают композитные материалы. Из металлических частей присутствуют стойки шасси и двигатели. Примером такого самолёта может служить австрийский самолёт – Diamond DA-42MNG (рис. 7) [1].



Рисунок 7 – Diamond DA-42MNG

Российское авиационное производство отстаёт от зарубежных товарищей, но с каждым годом набирает обороты. Одним из ранних примеров отечественных самолётов с использованием композитных материалов можно назвать Ту-204 (рис. 8), который был выпущен еще в начале 90-х годов. Он на 25 % состоял из композитных материалов: закрылки, элероны, рули направления и высоты, интерцепторы, а так же панели люков, полов и интерьера. Вес Ту-204 благодаря использованию композитных материалов стал на 1200 кг меньше, чем вес аналогичной полностью металлической модели. А снижение веса самолета на 1 кг экономит от 2 до 3 тонн топлива в год.



Рисунок 8 – Ту-204

Ещё один пример – военно-транспортный самолёт Ил-476 (рис. 9). Благодаря крыльям из композитного материала взлётная масса самолёта составляет 210 тонн, а грузоподъёмность увеличилась до 60 тонн.



Рисунок 9 – Ил-476

Наиболее известными самолётами можно назвать так же МС-21 (рис. 10), АН-2 (рис. 11), а так же SSJ 100 (рис. 12). Из композитных материалов в самолёте Мс-21 произведены конструкции крыльев, хвостовое оперение (углепластик), носовой обтекатель (стекловолокно). Благодаря использованию композитов (углеволокно) в строении Ан-2, удалось получить самолёт, который способен летать дальше своих собратьев при тех же затратах топлива и быть более загруженным. Доля композитных материалов в Superjet 100 невелика, из них изготавливаются элероны, рули, тормозные щитки, обтекатели носового конуса, стыка крыла и фюзеляжа, а так же интерцепторы.



Рисунок 10 – МС-21



Рисунок 11 – АН-2



Рисунок 12 – SSJ 100

Основными дефектами в конструкциях из композитных материалов в авиастроении являются технологические и эксплуатационные нарушения: коррозия под краской, непрочности и расслоения между слоями материала, наличие воды и жидкостей в сотах, пористость, повреждения от ударов (например, птиц).

1.2 Композитные материалы

Композитные материалы – это комбинации двух или нескольких отдельных материалов, которые обладают такими свойствами, которыми по отдельности составляющие материалы не владеют [2].

По строению композитные материалы делятся на материалы с неметаллической и металлической матрицей. В качестве неметаллической матрицы используются углеродные, полимерные и керамические материалы. Достаточно прочными являются композитные материалы, которые имеют в

своей структуре металлическую матрицу, например, из алюминия, никеля, их сплавов за счёт высокопрочных волокон или тонкодисперсных тугоплавких частиц [3].

Композитные материалы превосходят все известные конструкционные сплавы по следующим свойствам: высокой прочности и жесткости. Изменяя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентацию наполнителя, можно получить материал с необходимым набором свойств. Наполнитель позволяет определить прочность, жесткость и способность к деформации материала. Монолитность материала и стойкость к различным внешним воздействиям обеспечивается благодаря матрице [4].

Особенностью композитных материалов является анизотропность их свойств, которая определяется ориентацией армирующих волокон. Необходимую прочность материала можно получить, ориентируя волокна наполнителя в направлении действия основных усилий.

Наиболее распространены в авиастроении композитные материалы на основе высокопрочных волокон. По мнению некоторых специалистов наиболее перспективны композитные материалы, в качестве упрочняющей арматуры которых используются волокна углерода, бора и карбида бора. К таким материалам относятся углепластики, боропластики, бороалюминий. Так же не стоит забывать про стеклопластик. Данный материал так же используется в авиапромышленности.

Углепластик – это многослойный материал, который представляет собой углеволоконное полотно. Связующим звеном являются термореактивные полимерные смолы, например, эпоксидные, полиэфирные, термопласты [5].

Широкое применение углепластика объясняется его уникальными эксплуатационными свойствами. Общим для всех видов углепластика является армирующий элемент, которым является углеродное волокно. Оно обладает таким свойством, как анизотропия, т.е. прочно только в одном направлении, работают на растяжение, имеют низкую прочность на изгиб.

Углепластик обладает следующими свойствами: высокой прочностью и жёсткостью, износостойкостью, низкой плотностью, ползучестью, радиационной стойкостью, малой, по сравнению со сталью, массой [6].

На рисунке 13 представлен углепластик.

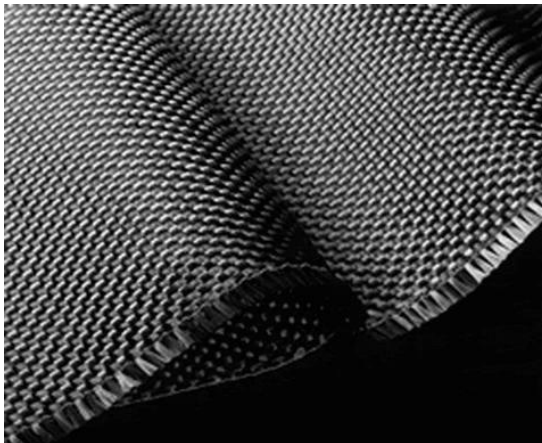


Рисунок 13 – Углепластик

Углепластик в авиапромышленности используют для изготовления крыльев самолётов (например, Т-50), фюзеляжа, панелей истребителей и других деталей летательных аппаратов.

Боропластик – это многослойный материал, который состоит из борных волокон и полимерного связующего.

Данный материал обладает следующими свойствами: высокими прочностью и жёсткостью, твердостью, теплопроводностью и электропроводностью, так же материал обладает высокой хрупкостью, что ограничивает форму изделий.

На рисунке 14 представлен боропластик.

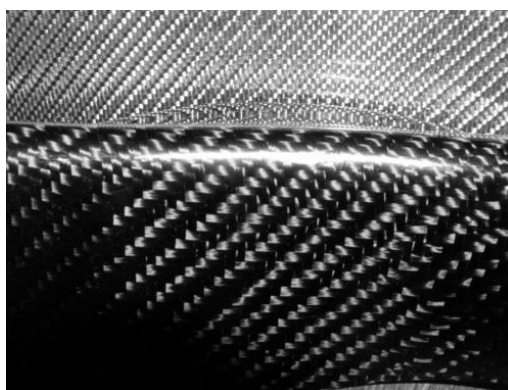


Рисунок 14 – Боропластик

Боропластики в авиапромышленности используются для изготовления деталей, которые подвержены нагрузкам в агрессивных средах. Так же применяются для снижения массы высоконагруженных деталей, например, поверхностей управления, панелей стабилизаторов.

Стеклопластик – это многослойный материал, который состоит из стекловолокна и полимерного связующего.

Данный материал обладает такими свойствами, как малый вес, высокая коррозионная стойкость, небольшой удельный вес, низкая теплопроводность, хорошая электроизоляция.

На рисунке 15 представлен стеклопластик.

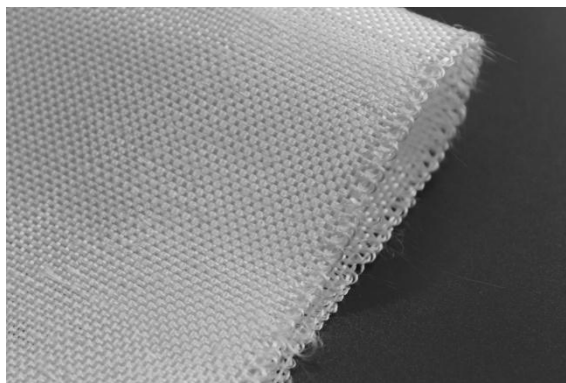


Рисунок 15 – Стеклопластик

В авиапромышленности стеклопластики применяют для создания средненагруженных элементов внешнего контура летательных аппаратов конструкционного и радиотехнического назначения, створок шасси и грузовых отсеков, капотов, обшивок панелей, люков, дверей и других деталей.

1.3 Методы теплового неразрушающего контроля

Тепловой неразрушающий контроль – это метод контроля материалов с помощью анализа тепловых потоков [7]. При воздействии на объект контроля тепловой энергией происходит выделение или поглощение тепла, выводит объект из температурного равновесия с окружающей средой. Распределение температуры по поверхности – источник необходимой информации о процессе

передачи тепла, внутренней структуры объекта, наличии подповерхностных дефектов.

Обратная задача теплового контроля – определение конфигурации и/или теплофизических характеристик объекта контроля и дефектов с помощью регистрации во время экспериментов изменения температуры во времени и пространстве [7].

Существует два метода теплового неразрушающего контроля: пассивный и активный.

Согласно ГОСТ Р 56511-2015 [8] пассивный тепловой неразрушающий контроль предназначен для контроля теплового режима и обнаружения геометрических размеров и отклонений от заданной формы объекта контроля. При данном методе теплового контроля на объект не производят нагрев внешним источником энергии. Данный метод нашел широкое применение во многих отраслях современной промышленности, например, тепловая диагностика, энергетика, экологический мониторинг, выявление тепловых аномалий. Преимуществом пассивного теплового контроля является возможность контролировать объект, не выводя его из эксплуатации, а так же нет необходимости в дополнительном источнике нагрева. Объектами контроля данного метода являются, например, контакты под напряжением, электроприборы, находящиеся в работе, строительные конструкции.

Под термином активный тепловой неразрушающий контроль понимают контроль материалов с использованием дополнительных источников теплового нагрева путем анализа тепловых потоков от объекта исследования [7]. Данный метод контроля, согласно ГОСТ Р 56511-2015 [8] предназначен для контролирования теплового режима исследуемого объекта, обнаружения изменений в структуре и физико-химических свойствах, например, теплопроводность, теплоемкость, коэффициент излучения. Данный метод теплового контроля применяется в авиакосмической промышленности, инфракрасной влагометрии, так же используется для контроля сварных соединений и пайки, машиностроении, материаловедении. Активный тепловой

контроль подразделяется на три ветви: тепловая дефектоскопия – обнаружение дефекта и его расположение; тепловая дефектометрия – определение глубины залегания дефекта, его размеров; тепловая томография – синтез внутренней структуры объекта контроля.

Согласно ГОСТ Р 56511-2015 [8] существует две схемы контроля при пассивном и активном тепловом методе контроля: односторонний (рис. 16) и двусторонний (рис. 17).

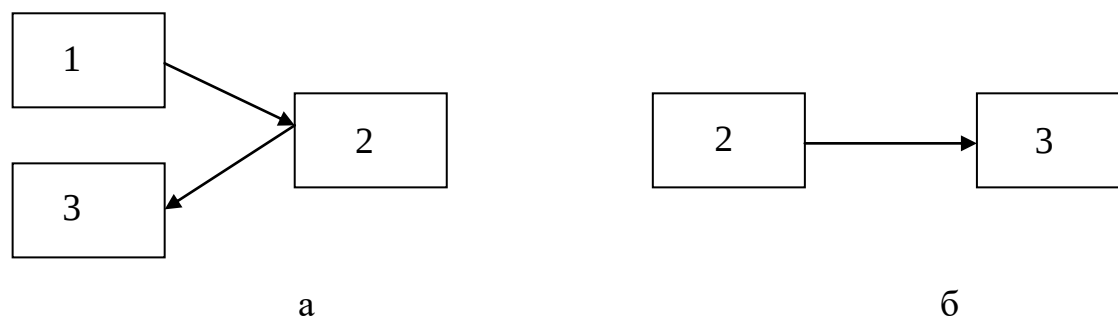


Рисунок 16 – Схема одностороннего контроля (а – активный, б - пассивный)

где:

1 – внешний источник нагрева;

2 – объект контроля;

3 – приемник излучения.

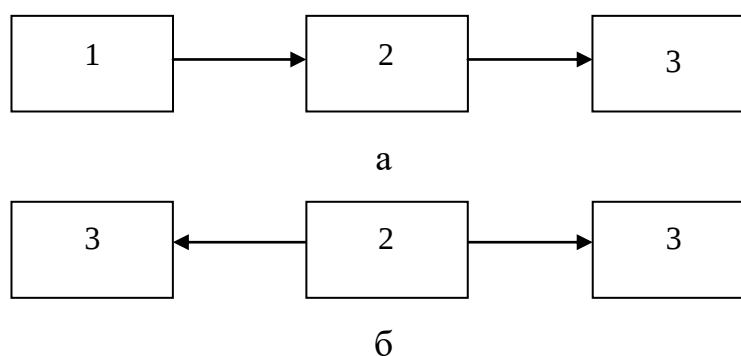


Рисунок 17 – Схема двустороннего контроля (а – активный, б - пассивный)

где:

1 – внешний источник нагрева;

2 – объект контроля;

3 – приемник излучения.

При исследовании объектов активным тепловым методом контроля возможно использование и других схем проведения экспериментов, а именно: комбинированной (рис. 18), синхронной (рис. 19) и несинхронной (рис. 20).

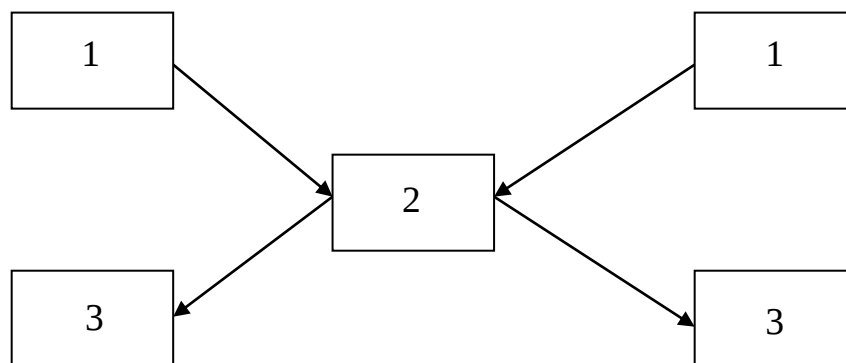


Рисунок 18 – Схема комбинированного контроля

где:

- 1 – внешний источник нагрева;
- 2 – объект контроля;
- 3 – приемник излучения.

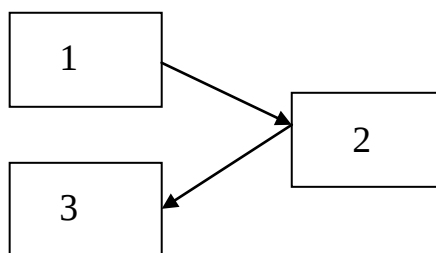


Рисунок 19 – Схема для синхронного активного теплового контроля

где:

- 1 – внешний источник нагрева;
- 2 – объект контроля;
- 3 – приемник излучения.

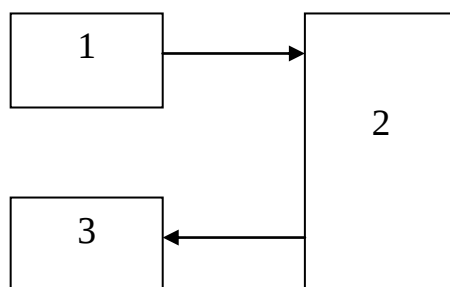


Рисунок 20 – Схема для несинхронного активного теплового контроля

где:

1 – внешний источник нагрева;

2 – объект контроля;

3 – приемник излучения.

Для проведения экспериментов по обнаружению дефектов в объекте контроля необходимо провести следующие действия:

- Подготовить объект контроля к процедуре контроля (например, очистка поверхности от загрязнений);
- Подготовить аппаратуру и проверить ее на работоспособность;
- Определить параметры проведения эксперимента, взаиморасположения аппаратуры и объекта контроля;
- Подвести к объекту контроля необходимую тепловую энергию;
- Зарегистрировать температурный сигнал;
- Получить последовательность термограмм с помощью персонального компьютера (ПК);
- Обработать последовательность термограмм исследуемого объекта контроля.

Конкуренцию по обнаружению подповерхностных дефектов тепловому неразрушающему контролю может составить ультразвуковой метод, однако, он имеет ряд недостатков, главным из которых является его трудоемкость применительно к большим поверхностям исследования, данный метод является контактным, что так же является минусом. Тепловой метод бесконтактный и позволяет за одно исследование охватить достаточно большой участок поверхности объекта контроля.

При АТНК объект контроля с помощью специальных источников нагрева выводят из состояния термодинамического равновесия, сигнал регистрируют при помощи тепловизионных средств, полученную последовательность термограмм переносят из памяти устройства в память ПК с помощью специального программного продукта, который поставляется совместно с каждым тепловизором. С помощью данного продукта можно

проводить обработку и документацию одиночных термограмм. Заключительной операцией считается обработка последовательностей термограмм с помощью специально разработанных программ. Для целей АТНК собственные программы применять не рекомендуется, в основном их можно использовать для пассивного метода теплового контроля.

2 Методы обработки термограмм в программе ThermoFit Pro

Сотрудниками ИНК ТПУ лаборатории №34 была разработана программа ThermoFit Pro, которая предназначена для обработки последовательностей термограмм, позволяет выявлять дефекты, более наглядно представлять информацию о структуре объекта контроля и определять его параметры.

Следующие виды обработки термограмм реализованы в данной программе: **Fitting, Fourier, Derivative, Tomography, Correlation, PCA, CWT, Complex CWT.**

Опция **Fitting** позволяет формировать сглаженную попиксельно во времени последовательность термограмм полиномами от третьей до шестой степени. Следующая опция **Fourier** дает возможность проводить спектральный анализ временной последовательности термограмм. Опция **Derivative** вычисляет два вида производных. С помощью опции **Tomography** определяют характерные времена поведения температурных сигналов при нагреве и/или остывании исследуемого объекта контроля. Опция **Correlation** определяет на бездефектных участках отклонения от классического режима нагрева/остывания. Статистический метод обработки термограмм, с помощью которого можно выявить неоднородные структуры в объекте контроля можно использовать с помощью опции **PCA** (метод главных компонент). Еще одна опция, присутствующая в программе, **CWT** – Вейвлет преобразование, позволяет анализировать временную последовательность термограмм. **Complex CWT** – опция программы ThermoFit Pro, которая необходима для тех же действий, что и предыдущая, но позволяет проводить спектральный анализ в виде вейвлетов.

Программа ThermoFit Pro имеет еще две опции: **1D-Defect Characterization** и **3D-Defect Characterization**. Первая опция служит для обработки термограмм и основана на эмпирическом методе, весомый

недостаток – большая погрешность. Позволяет определить глубину залегания дефектов. Вторая опция дает более точные результаты по сравнению с предыдущей.

Ещё одним программным обеспечением, в котором можно проводить обработку последовательностей термограмм является Mathcad. Для работы в данной среде необходимо создать и записать алгоритм обработки последовательности.

3 Аппаратура активного теплового неразрушающего контроля

3.1 Источники теплового нагрева

Один из первых шагов исследования объекта контроля на наличие дефектов – это тепловая стимуляция (тепловой нагрев/охлаждение), что производят с помощью специальных источников.

Основными характеристиками источников теплового нагрева [9] являются:

- геометрические размеры зоны нагрева;
- спектр излучения;
- мощность нагрева;
- энергия нагрева.

Оптические устройства, которые могут использоваться в качестве источников нагрева следующие: резистивные и индукционные нагреватели, СВЧ источники, воздушные «пушки». Индукционные и резистивные нагреватели используют при контроле токопроводящих объектов. СВЧ источники применяют для контроля увлажненных материалов, которые поглощают СВЧ энергию. Оптические нагреватели и устройства являются универсальными источниками нагрева. Наибольшей популярностью пользуются устройства на основе галогенных ламп. Могут использоваться в двух режимах нагрева – непрерывном и периодическом. В некоторых случаях при циклическом нагреве обеспечивается максимальный температурный контраст в определенном временном интервале [10].

Для импульсных источников нагрева (например, лампы-вспышки, лазеры) основной параметр – энергия нагрева. Мощность нагрева – это важная характеристика для других источников (ИК лампы, электрические лампы, тепловые пушки и др.).

В материале объекта контроля, а также в окружающей среде, из-за присутствия эффектов отражения и поглощения не вся энергия источника нагрева может поглощаться объектом контроля и участвовать в создании температурных отклонений над дефектами. Нагрев с помощью оптического излучения в видимом диапазоне может сопровождаться существенными отражениями от поверхности исследуемого объекта. Наиболее эффективным является нагрев тепловым излучением вследствие более высокого коэффициента поглощения.

Тепловая стимуляция производится путём нагрева/охлаждения, что является равноценным при одной и той же мощности теплового потока. Наиболее часто используют нагрев с помощью полей излучения или потоков твёрдых частиц и газа, учитывая при этом фактор технологичности, достижимые плотности тепловых потоков и допустимые помехи.

Для получения в зоне стимуляции наибольшей мощности используют нагрев с помощью оптического излучения, который может генерироваться различными типами ламп или лазеров. Наиболее просто поверхность объекта контроля можно нагреть с помощью ламп накаливания. При произвольном времени нагрева в области диаметром не более одного метра плотность нагрева может достигать нескольких кВт/м².

Галогенные лампы, которые могут обеспечивать в течение некоторого короткого времени (миллисекунды – секунды) плотность энергии до 100 кВт/м², возможно применять для стимуляции металлов. Лазеры способны создать практически любую плотность энергии, но из-за больших габаритов, низкого коэффициента полезного действия и высокой стоимости их применение в тепловом контроле ограничивают лабораторными исследованиями. Наиболее эффективны при контроле металлов, используемые в фотографической технике, мощные лампы-вспышки [9].

На рисунках 21, 22, 23 представлены оптические нагреватели, а именно: лампы накаливания с рефлектором, галогенные лампы и импульсные ксеноновые лампы.



Рисунок 21 – Лампы накаливания с рефлектором

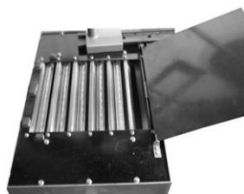


Рисунок 22 – Галогенные лампы

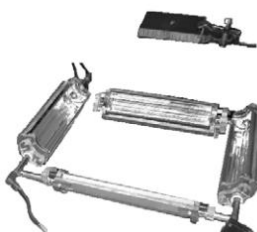


Рисунок 23 – Импульсные ксеноновые лампы

В таблице 1 представлены некоторые характеристики оптических нагревателей, показанных выше.

Таблица 1 – Сравнение характеристик оптических нагревателей

	Лампы накаливания	Галогенные лампы	Импульсные ксеноновые лампы
Неравномерность нагрева, %	300	25	10
Длительность нагрева, с	1-1000	5-50	0,001
Максимальная плотность энергии, кВт/м ²	2	5	25

3.2 Приемники теплового излучения

В зависимости от способа измерения температуры приёмники теплового излучения можно разделить на контактные и бесконтактные.

Наиболее распространёнными контактными приёмниками являются термопары, термоиндикаторы, термокарандаши, манометрические и жидкостные термометры, а так же металлические и полупроводниковые сопротивления. Наиболее известные бесконтактные приёмники – это тепловизоры и пирометры, так же к ним относятся термографы и квантовые счетчики.

При современной чувствительности аппаратуры (на примере тепловизора) возможно зарегистрировать на поверхности объекта контроля разность температур менее $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11]. Т.к. в производственных условиях уровни тепловых шумов имеют величины равные примерно $0,3 - 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, то для регистрации теплового поля объекта не имеет особого значения настолько высокая чувствительность аппаратуры. Тепловые шумы чаще всего могут быть вызваны загрязнением поверхностей объектов контроля, неравномерностью их коэффициента, а так же изменением условий теплообмена с окружающей средой.

Наибольшей популярностью из всех тепловых приборов пользуются тепловизоры и пирометры. Опираясь на ГОСТ Р 8.619 – 2006 [12], тепловизор – это оптико-электронное устройство, которое предназначено для бесконтактного наблюдения, измерения и регистрации пространственных/пространственно-временных распределений температур объектов контроля, которые находятся в зоне контроля прибором, с помощью создания последовательностей термограмм и установления температуры поверхности объекта с помощью известных коэффициентов излучения и параметров съёмки. Тепловизоры можно разделить на два типа – наблюдательные и измерительные. В первом случае можно только наблюдать инфракрасное изображение объекта контроля,

во втором происходит присвоение цифровому сигналу каждого пикселя определенной температуры, что даёт возможность получить тепловую карту поверхности объекта.

Тепловизор, работает по принципу преобразования потока инфракрасного излучения от исследуемого объекта в электрический сигнал, который пропорционален тепловой спектральной мощности потока излучения. Структурная схема прибора представлена на рисунке 24. Уровень температур каждой точки фиксируется и изображается определённым цветом. Информация записывается в память устройства и в дальнейшем может быть обработана на ПК с помощью специального ПО.

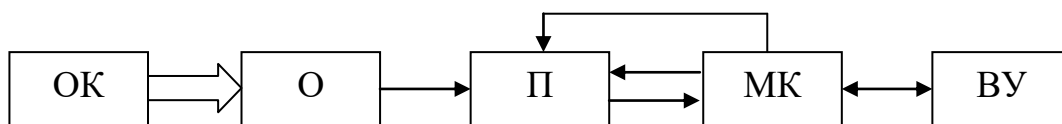


Рисунок 24 – Структурная схема тепловизора

где ОК – объект контроля, О – ИК-объектив, П – матричный ИК-фотоприемник, МК – микроконтроллер, ВУ – внешнее устройство, например, экран.

От объекта контроля исходит поток теплового излучения, который попадает в объектив (О) и далее поступает на матричный ИК-фотоприемник (П). Приемник излучения преобразует тепловой поток в электрический сигнал. Далее информация поступает на микроконтроллер (МК), где происходят необходимые преобразования, и формируется изображение, которое выводится на экран тепловизора или ПК (ВУ) [13].

Наиболее часто при активном и пассивном методе неразрушающего контроля применяют тепловизоры. На сегодняшний день данные приборы – это самый оптимальный инструмент для всех случаев, в которых о техническом состоянии объектов контроля можно судить по неоднородности теплового поля. С помощью тепловизоров можно быстро и надёжно определить точки аномального нагрева и проблемные участки при техническом обслуживании во многих областях промышленности.

На рисунке 25 показан тепловизор NEC, с помощью которого проводились лабораторные эксперименты.



Рисунок 25 – Тепловизор NEC

При пассивном контроле применяют пирометр. Данный прибор позволяет бесконтактно измерять температуру объекта исследования (рис. 26).

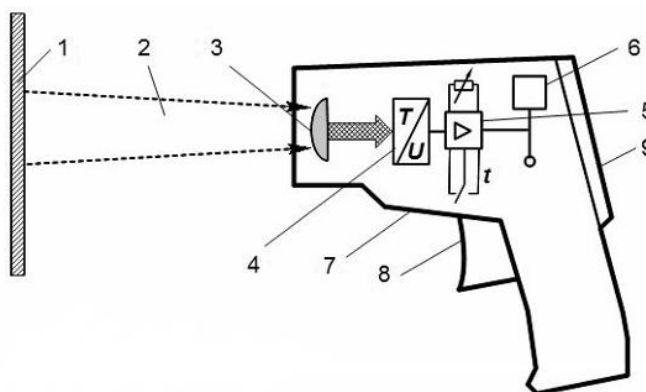


Рисунок 26 – Устройство пирометра

где: 1 – поверхность объекта контроля, 2 – тепловое излучение, 3 – оптическая система инфракрасного термометра, 4 – датчик-преобразователь, 5 – электронный преобразователь, 6 – счётное устройство, 7 – корпус пирометра, 8 – курок-кнопка и 9 – дисплей.

Работа пирометра основана на измерении мощности теплового излучения от объекта контроля в инфракрасном и видимом диапазоне света и преобразовании данного значения в температуру [14]. На рисунке 27 показан пирометр MLG 33.



Рисунок 27 – Пирометр MLG 33

Пирометры используют в случаях, когда по определённым причинам нет возможности использовать контактные термометры. Часто применяют данные приборы для дистанционного теплового контроля объектов с достаточно высокой температурой поверхности, а так же в случаях, когда нет возможности физического контакта с необходимым объектом из-за труднодоступности. Пирометры применяются во многих областях промышленности, как пассивные измерители, например, в теплоэнергетике, строительстве, медицине, а так же в быту. В активном тепловом неразрушающем контроле практически не используются, т.к. в приоритете применение тепловизора.

3.3 Тепловые дефектоскопы

В общем случае дефектоскоп – прибор для обнаружения дефектов в объекте контроля из различных материалов с помощью неразрушающего контроля. С помощью дефектоскопа можно обнаружить такие дефекты, как, например, нарушения сплошности или однородности структуры материала, коррозию. Дефектоскопы нашли применение во многих областях промышленности. С помощью данных приборов возможно проводить контроль изделия с высокой собственной температурой или объектов, которые находятся в движении со значительной скоростью [15].

Виды дефектоскопов:

- акустические и его разновидности;
- импульсные;
- импедансные;
- резонансные;
- магнито-порошковые;
- вихретоковые;
- феррозондовые;
- электроискровые;
- термоэлектрические;
- радиационные;
- радиоволновые;
- электронно-оптические;
- капиллярные;
- инфракрасные.

Рассмотрим подробнее инфракрасные (тепловые) дефектоскопы. Согласно ГОСТ Р 53698-2009 [16] тепловой дефектоскоп – это прибор, который служит для выявления дефектов в объекте контроля не нарушая его целостность. Данные приборы позволяют обнаружить инфракрасное изображение дефектов объекта контроля в его проходящем, отражённом или собственном излучении.

Из статьи «В ТПУ разработали тепловой дефектоскоп-томограф» [22] известно, что в лаборатории № 34 в ТПУ был разработан тепловой дефектоскоп. Он не имеет аналогов и помогает обнаружить в композитных материалах, которые используют в производстве самолётов, различного рода дефекты, например, удары птиц о самолет, водный конденсат, непрочности в самом материале. Главное преимущество тепловых дефектоскопов заключается в бесконтактном методе контроля и высокой производительности. Данный дефектоскоп показан на рисунке 28.



Рисунок 28 Тепловой дефектоскоп

Так же в данной лаборатории были смонтированы еще три тепловых дефектоскопа, которые показаны на рисунках 29, 30, 31.



Рисунок 29 – Тепловой дефектоскоп



Рисунок 30 – Тепловой дефектоскоп



Рисунок 31 – Тепловой дефектоскоп

Тепловой дефектоскоп, показанный на рисунке 29, имеет в своём составе тепловизор FLIR, 4 галогенных лампы мощностью 500 Вт каждая, мощность теплового потока составляет 1500 Вт/м^2 , так же имеет металлические шторки с механическим приводом, позволяет определять дефекты на расстоянии примерно 2,5 м.

На рисунке 30 представлен тепловой дефектоскоп, состоящий так же из тепловизора FLIR, 4 галогенных лампы мощностью 500 Вт каждая и металлических шторок, мощность теплового потока составляет 1700 Вт/м^2 . Данный прибор был смонтирован для работы в совокупности с механической рукой, для обнаружения дефектов на близком расстоянии.

На рисунке 31 показан дефектоскоп со светодиодным источником нагрева, мощностью 1000 Вт, мощность теплового потока составляет, примерно, 900 Вт/м^2 .

На рисунках 32 и 33 показаны общие схемы контроля с помощью тепловых дефектоскопов, а именно односторонний и двусторонний контроль.

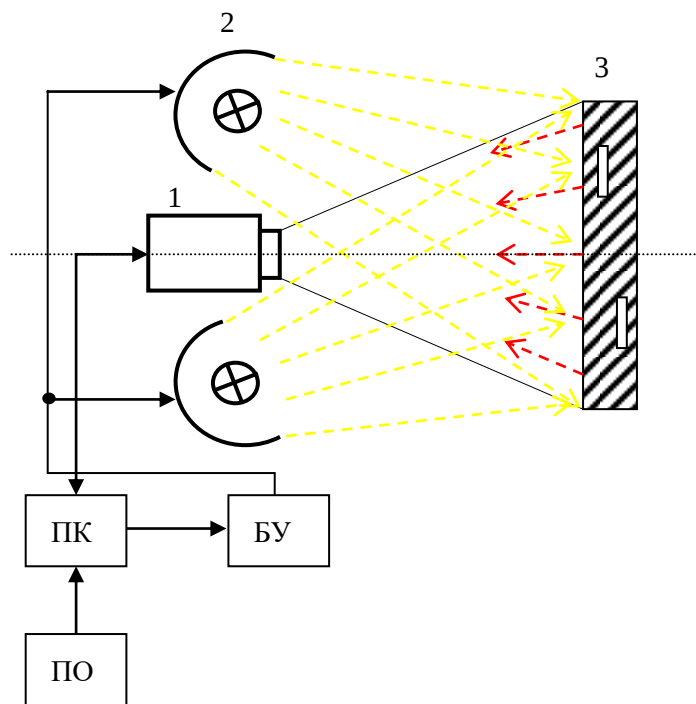


Рисунок 32 – Схема одностороннего контроля

где 1 – тепловизор, 2 – тепловой источник нагрева, 3 – объект контроля.

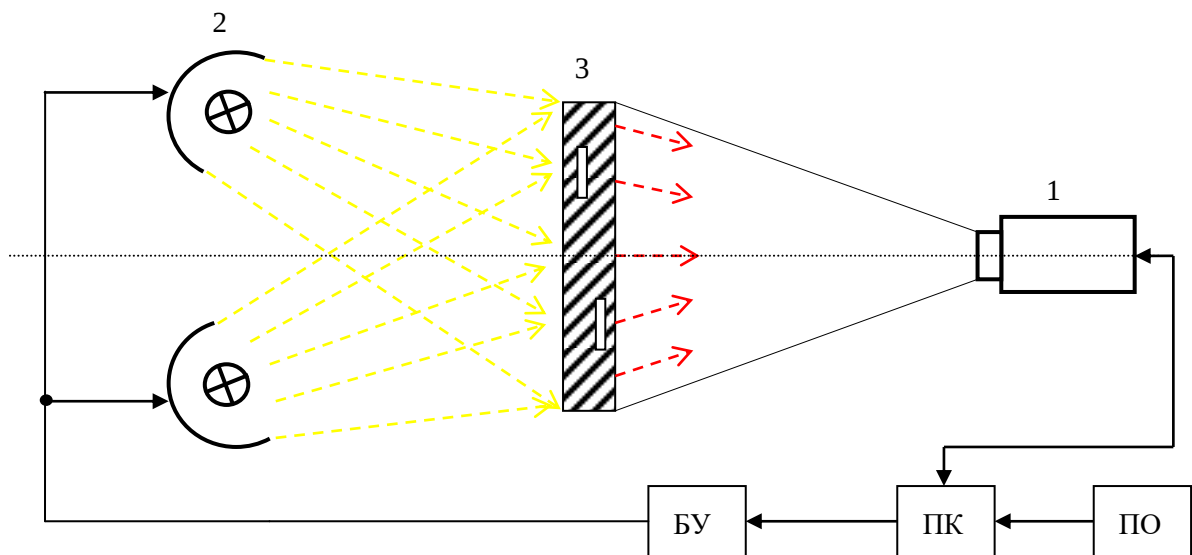


Рисунок 33 – Схема двустороннего контроля

где 1 – тепловизор, 2 – тепловой источник нагрева, 3 – объект контроля.

При одностороннем контроле можно определить область, где находится дефект, а так же увидеть, что дефекты находятся на различной глубине. При двустороннем контроле так же можно определить дефекты, но нельзя понять, на какой глубине они находятся относительно поверхности. Поэтому для экспериментальных исследований используется в данной работе односторонний метод контроля.

4 Экспериментальные исследования

4.1 Обнаружение дефектов в объекте контроля при различных источниках нагрева

Для того, чтобы начать экспериментальные исследования, первым шагом необходимо выбрать источник теплового нагрева объекта контроля (ОК). Возможные источники нагрева обусловлены наличием таковых в лаборатории: галогенные лампы и светодиодные лампы.

Для эксперимента в лабораторных условиях, был использован следующий объект контроля: панель, состоящая из двух пластин стеклопластика и бумажных сот между ними. Размеры ОК следующие: 44х62 см. Объект контроля показан на рисунке 34. Искусственно созданные дефекты в объекте – капли воды и эпоксидной смолы.



Рисунок 34 – Объект контроля

Установка для эксперимента представлена на рисунке 35.



Рисунок 35 – Экспериментальная установка

где 1 – тепловой дефектоскоп, 2 – объект контроля.

Напротив пластины (ОК) расположен тепловой дефектоскоп, который состоит из четырёх галогенных ламп, мощностью 500 Вт каждая и тепловизора фирмы Flir.

Для записи и обработки термограмм были использованы программа ThermoFit Pro и программа управления цифровым тепловизором. Перед началом эксперимента необходимо в программе управления задать исходные данные, а именно: время нагрева, время остывания, количество кадров снимаемых в секунду.

Параметры эксперимента: время нагрева – 4 с, время остывания – 4 с, количество циклов нагрева/остывания – 10, материал – стеклопластик. Расстояние между источником нагрева и ОК составляет 122 см. Вся установка находится в затемнённой комнате, что позволяет снизить влияние постороннего излучения от окружающих предметов.

Далее был проведен эксперимент, в котором источником нагрева выступили светодиодные лампы, которые представлены на рисунке 38. Суммарная мощность ламп 1 кВт, что в 2 раза меньше, чем у галогенного источника нагрева.

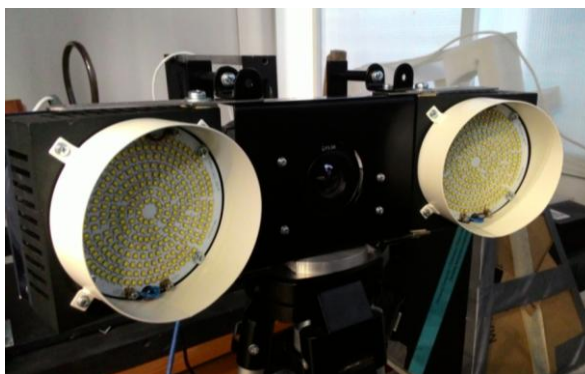


Рисунок 38 – Светодиодный источник нагрева

Параметры эксперимента прежние: время нагрева – 4с, время остывания – 4с, количество циклов нагрева/остывания – 10, материал – стеклопластик. Расстояние между источником нагрева и ОК составляет 122 см. Установка так же находится в затемнённой комнате.

4.2 Обнаружение дефектов в объекте контроля при периодическом нагреве и однократном нагреве

После выбора источника нагрева, были проведены эксперименты по определению преимуществ периодического нагрева над однократным нагревом.

В качестве объекта контроля использовалась сотовая панель, изготовленная из двух пластин стеклопластика, между которыми находятся бумажные соты. Размеры ОК: 22х31 см. Дефектами являются капли воды в сотах. Объект контроля расположен горизонтально и представлен на рисунке 41.



Рисунок 41 – Объект контроля

Установка для эксперимента по определению дефектов с помощью термоволнового контроля представлена на рисунке 42.

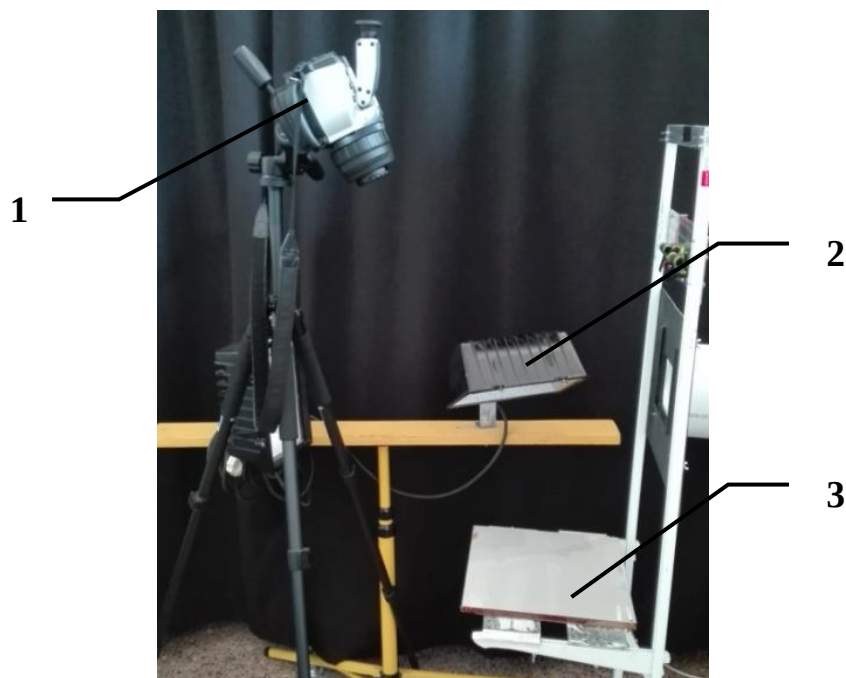


Рисунок 42 – Экспериментальная установка

Напротив ОК (3) расположен источник теплового нагрева (2) – галогенная лампа, мощностью 500 Вт и тепловизор (1).

Параметры эксперимента при периодическом нагреве: количество циклов нагрева/остывания – 5, время нагрева – 1 с, время остывания – 1 с. Расстояние между источником нагрева и ОК составляет 30 см.

Для записи и обработки термограмм были использованы программа ThermoFit Pro и программа управления (ПО) цифровым тепловизором NEC. Перед началом эксперимента необходимо в ПО ввести необходимые исходные

данные, а именно: время нагрева, время остывания, количество кадров снимаемых в секунду.

Далее представлены параметры и результаты аналогичного эксперимента при однократном нагреве.

Параметры эксперимента: время нагрева – 5 с, время остывания – 10 с, источник нагрева тот же. Расстояние между источником нагрева и ОК не изменилось.

4.3 Определение зависимости теплового сигнала от расстояния между источником нагрева и объектом контроля при различных параметрах эксперимента

Для проведения ряда экспериментов была собрана экспериментальная установка, схема которой показана на рисунке 49.

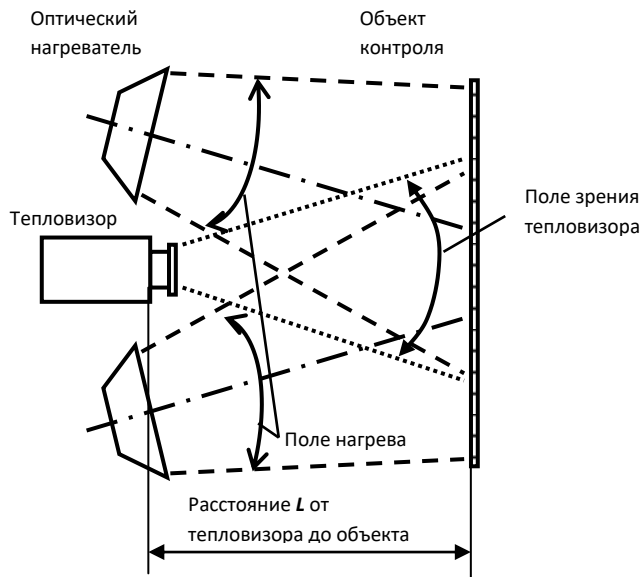


Рисунок 49 – Схема экспериментальной установки

В схеме присутствуют следующие элементы: тепловизор фирмы NEC, оптический нагреватель – четыре галогенные лампы мощностью по 500 Вт каждая, заключенные в стандартном светоотражательном корпусе, тип HL-2, ПК, программа управления оптическим нагревателем, блок питания и блок управления оптическим нагревателем (на схеме не показаны).

В качестве объекта контроля была выбрана пластина из стеклопластика, длина пластины – 170 мм, высота – 120 мм, толщина – 8,2 мм. В объекте контроля присутствуют 6 дефектных областей размерами 10х10х0,8 мм, расположенных на различном расстоянии от поверхности. Первый дефект находится на глубине 1 мм. Объект контроля показан на рисунке 50.

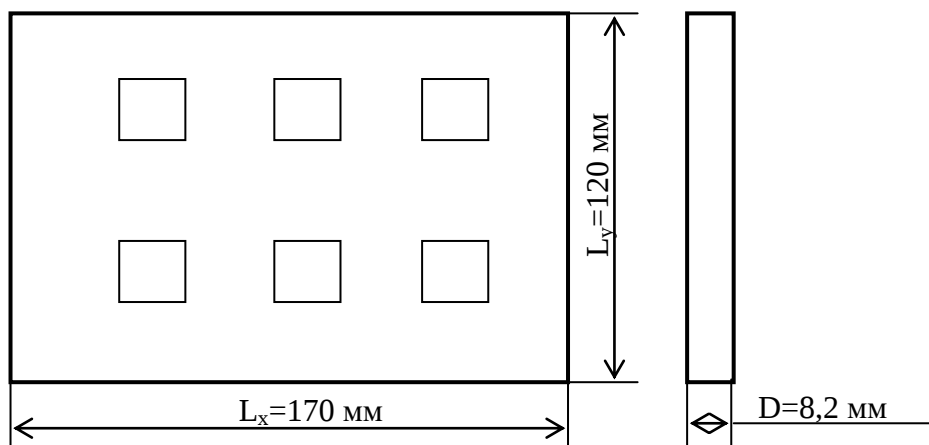


Рисунок 50 – Объект контроля

Для записи и обработки термограмм были использованы программа ThermoFit Pro и программа управления (ПО) цифровым тепловизором NEC. Перед началом эксперимента необходимо в ПО ввести необходимые исходные данные, а именно: время нагрева, время остывания, количество кадров снимаемых в секунду.

Параметры эксперимента № 1: периодический нагрев объекта контроля, время нагрева – 1 с, время остывания – 1 с, количество циклов – 10, расстояние между источником нагрева и объектом контроля – 1 м, источник нагрева – четыре галогенные лампы мощностью по 500 Вт каждая.

Работа по математическому моделированию экспериментов была проведена в специальной программе ThermoCalc_3D_Crossing, которая разработана сотрудником лаборатории №34 ИНК ТПУ Сухановым М. Для создания слоя с шумовой помехой на ОК использовалась программа MaskGenerator. Программа так же разработана в лаборатории № 34 ИНК ТПУ. На рисунке 51 представлена математическая модель ОК при экспоненциальном нагреве (в расчетных термограммах экспоненциальное пятно нагрева

отображается виде синего пятна) в идеальных условиях, из которой следует, что обнаружить можно три дефектных области.

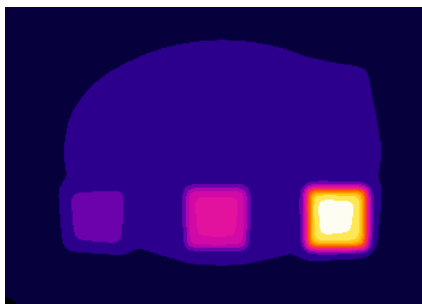


Рисунок 51 – Математическая модель ОК

Далее показана термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ».

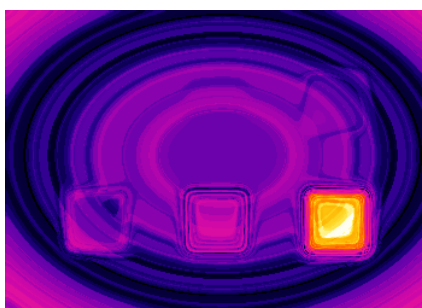


Рисунок 52 – Математическая модель ОК после обработки

Основываясь на данных, показанных на рисунке 52, можно сделать вывод о том, что в реальных условиях при подобном режиме контроля можно получить хорошо видимую область одного дефекта, менее заметны будут две следующие (отсчет справа налево) и слабо различима четвертая область.

Далее представлена математическая модель с шумовой помехой в 3 %, нагрев смоделирован с правого верхнего угла. Приведена термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ»:

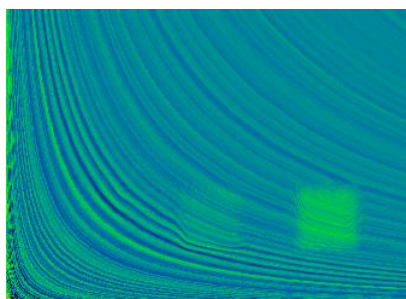


Рисунок 53 – Математическая модель ОК после обработки, шум 3 %

Как видно из термограммы выше, имея процент шума равный трём в сигнале, обнаружена одна область дефекта, расположенная ближе всего к поверхности ОК. Область второго дефекта плохо различима.

Далее представлена математическая модель с шумовой помехой в 3 %, нагрев смоделирован сверху относительно ОК. Приведена термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ»:

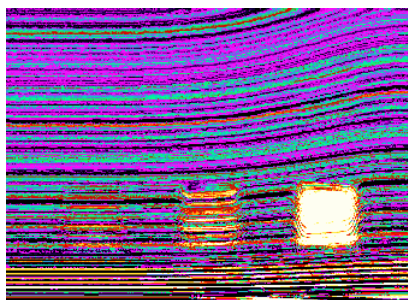


Рисунок 54 – Математическая модель ОК после обработки, шум 3 %

Как видно из термограммы выше, имея процент шума равный трём и производя нагрев со стороны, а не с угла (рис. 53), можем обнаружить явно одну область дефекта, расположенную ближе всего к поверхности. А так же возможно обнаружить области второго и третьего дефектов с более слабым сигналом.

Далее представлена математическая модель с шумовой помехой в 50 %, нагрев смоделирован с левого верхнего угла относительно ОК. Приведена термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ»:

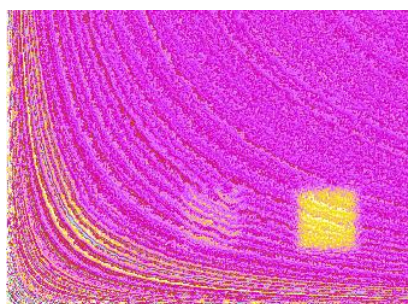


Рисунок 55 – Математическая модель ОК после обработки, шум 50 %

Как видно из термограммы на рисунке 55, имея процент шума равный 50 % в сигнале, можно обнаружить явно одну область дефекта, расположенную ближе всего к поверхности. А так же плохо различима область второго дефекта.

Далее представлена математическая модель с шумовой помехой в 50 %, нагрев смоделирован сверху относительно ОК. Приведена термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ»:

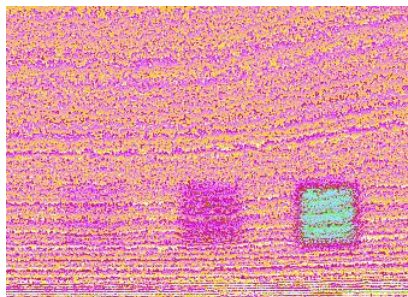


Рисунок 56 – Математическая модель ОК после обработки, шум 50 %

Параметры эксперимента № 2: периодический нагрев объекта контроля, время нагрева – 2 с, время остывания – 2 с, количество циклов – 5, расстояние между источником нагрева и объектом контроля – 1 м, источник нагрева – четыре галогенные лампы мощностью по 500 Вт каждая.

На рисунке 59 представлена математическая модель ОК при экспоненциальном нагреве в идеальных условиях.

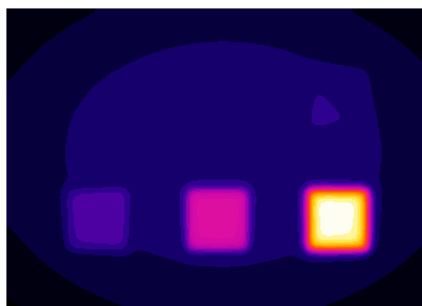


Рисунок 59 – Математическая модель ОК

Обнаружено три дефектных области, так же на термограмме присутствует неравномерность в овальной зоне нагрева экспоненциального вида.

Далее показана термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ».

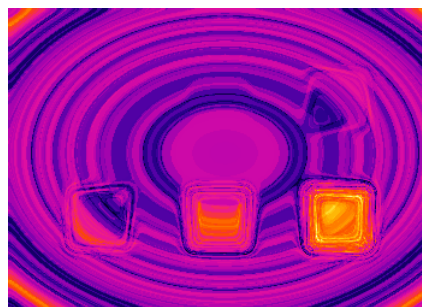


Рисунок 60 – Математическая модель ОК после обработки

По термограмме на рисунке 60 обнаружено две области дефектов близко расположенных к поверхности ОК, а так же еще две, но с ухудшенной видимостью границ дефектов.

Далее представлена математическая модель с шумовой помехой равной 3 %, нагрев смоделирован с правого верхнего угла. Приведена термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ»:

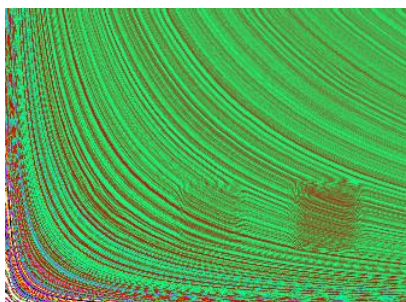


Рисунок 61 – Математическая модель ОК после обработки

Как видно из термограммы выше, после обработки результатов эксперимента должны быть обнаружены два дефекта.

Параметры эксперимента № 3: периодический нагрев объекта контроля, время нагрева – 3,3 с, время остывания – 3,3 с, количество циклов – 3, расстояние между источником нагрева и объектом контроля – 1 м, источник нагрева – четыре галогенные лампы мощностью по 500 Вт каждая.

На рисунке 64 представлена математическая модель ОК при экспоненциальном нагреве в идеальных условиях.

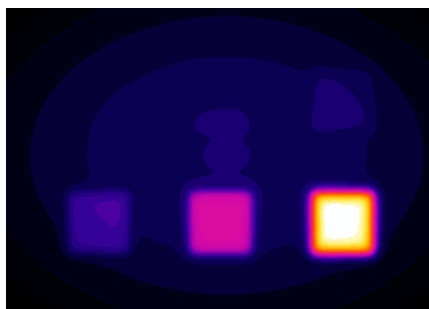


Рисунок 64 – Математическая модель ОК

По математической модели обнаружено три дефектных области, а так же неравномерность в овальной зоне нагрева экспоненциального вида, как и в предыдущем эксперименте.

Далее показана термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ».

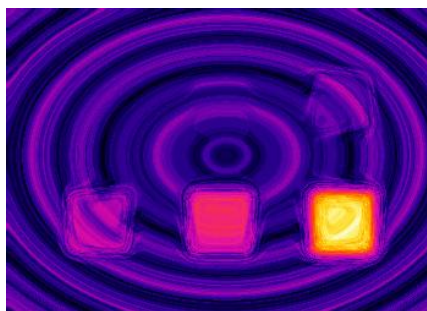


Рисунок 65 – Математическая модель ОК после обработки

По рисунку 65 видим, что после обработки стало возможным явно обнаружить две области дефектов близко расположенных к поверхности, а так же еще две, но с ухудшенной видимостью границ дефектов. Почти неразличима еще одна область дефекта.

Далее представлена математическая модель с шумовой помехой в 3 %, нагрев смоделирован с правого верхнего угла. Приведена термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ»:

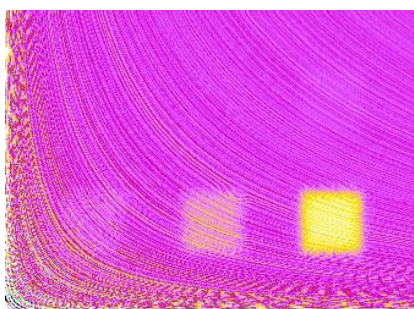


Рисунок 66 – Математическая модель ОК после обработки

Как видно из термограммы на рисунке 66, после обработки результатов эксперимента должны быть обнаружены два дефекта, а так же слабо различимы границы третьего дефекта.

Параметры эксперимента № 4: периодический нагрев объекта контроля, время нагрева – 5 с, время остывания – 5 с, количество циклов – 2, расстояние между источником нагрева и объектом контроля – 1 м, источник нагрева – четыре галогенные лампы мощностью по 500 Вт каждая.

На рисунке 69 представлена математическая модель ОК при экспоненциальном нагреве в идеальных условиях, при которых можно обнаружить три дефектных области, а так же присутствие неравномерности в овальной зоне нагрева экспоненциального вида.



Рисунок 69 – Математическая модель ОК

Далее показана термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ».

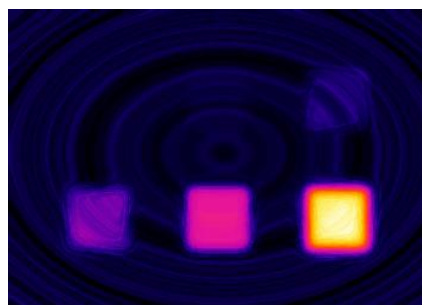


Рисунок 70 – Математическая модель ОК после обработки

Из рисунка 70 видно, что после обработки возможно обнаружить три области дефектов расположенных наиболее близко к поверхности, а так же еще одну, но с ухудшенной видимостью границ дефектов. Практически неразличима еще одна область дефекта.

Далее представлена математическая модель с шумовой помехой в 3%, нагрев смоделирован с правого верхнего угла. Приведена термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ»:

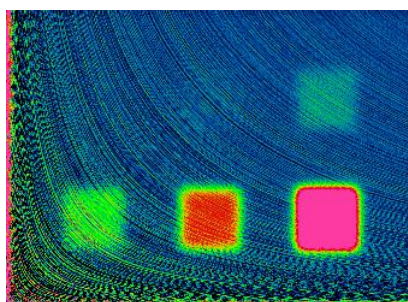


Рисунок 71 – Математическая модель ОК после обработки

Как видно из термограммы на рисунке 71, после обработки результатов эксперимента должны быть обнаружены три дефекта, а так же слабо различимы границы четвертого дефекта.

Параметры эксперимента №5: однократный нагрев объекта контроля, время нагрева – 10 с, расстояние между источником нагрева и объектом контроля – 1 м, источник нагрева – четыре галогенные лампы мощностью по 500 Вт каждая.

В результате эксперимента получена последовательность термограмм, которая была обработана в программе ThermoFit Pro опцией «Фурье-анализ».

На рисунке 74 представлена математическая модель ОК при экспоненциальном нагреве в идеальных условиях.

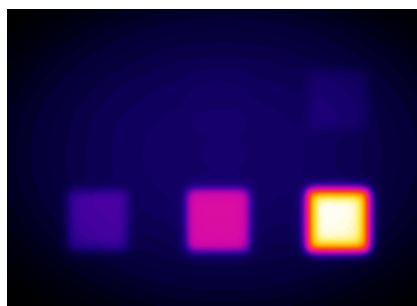


Рисунок 74 – Математическая модель ОК

Из рисунка 74 следует, что обнаружить можно три дефектных области. Далее показана термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ».

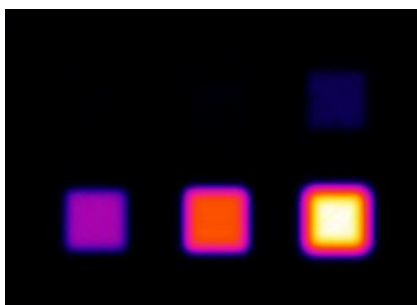


Рисунок 75 – Математическая модель ОК после обработки

Из рисунка 75 видим, что после обработки возможно обнаружить четыре области дефектов.

Далее представлена математическая модель с шумовой помехой в 3%, нагрев смоделирован с правого верхнего угла. Приведена термограмма после обработки опцией «Фурье-анализ»:

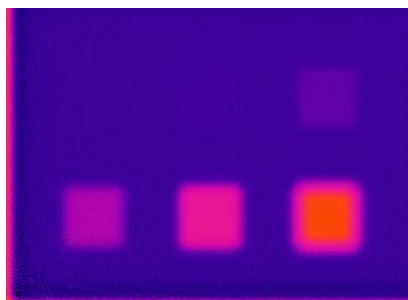


Рисунок 76 – Математическая модель ОК после обработки

Как видно из термограммы на рисунке 76, после обработки результатов эксперимента должны быть обнаружены три дефекта, а так же слабо различимы границы четвертого дефекта, как и в предыдущем эксперименте.

4.4 Определение дефектов при разнообразной окраске поверхности контроля и на различном расстоянии между ОК и дефектоскопом

На первом этапе исследований определена выявляемость дефектов в панелях при одностороннем контроле на различных расстояниях L между тепловым дефектоскопом и панелью – объектом контроля. На рисунке 79 представлена схема эксперимента.

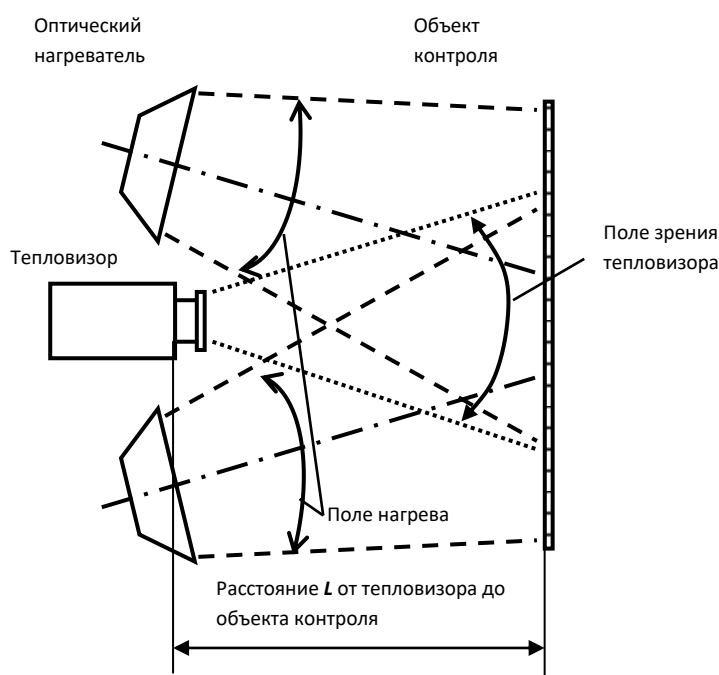


Рисунок 79 – Схема применения теплового дефектоскопа

Перед проведением экспериментальных исследований необходимо произвести измерение плотности потока нагрева на различных расстояниях L . Результаты измерений показаны в таблице 4. В качестве оптического нагревателя использовали две галогенные лампы мощностью по 1 кВт каждая, заключенные в стандартном светоотражательном корпусе, тип HL-2.

Таблица 4 – Плотность теплового потока оптического нагревателя

L, м	0,6	1	1,5	2	2,5	3	3,5
W, Дж/м ²	15,98	8,34	5,56	6,95	4,87	1,39	2,09

Из таблицы 4 видно, что имеется сильная зависимость плотности потока оптического нагревателя от расстояния до объекта контроля. Для данного нагревателя зависимость имеет вид:

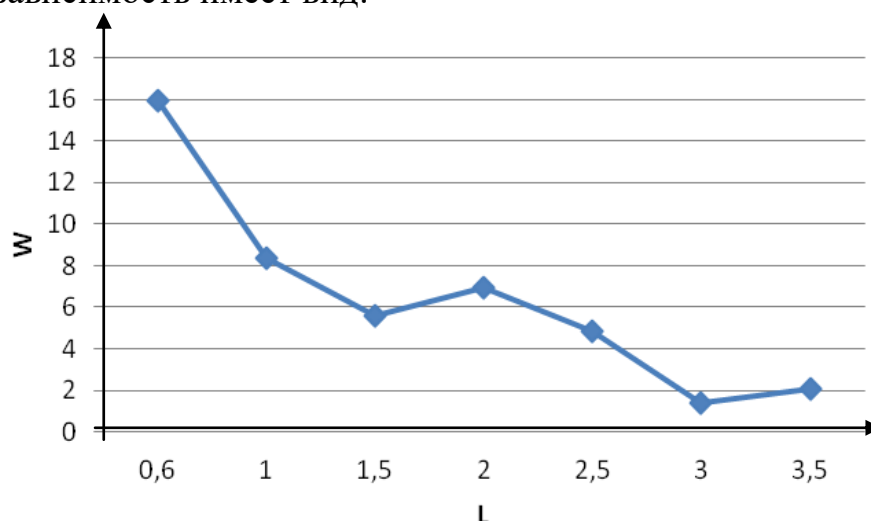


Рисунок 80 – Зависимость плотности нагрева панели от расстояния между нагревателем и панелью

По рисунку 80 можно сделать вывод о том, что, при увеличении расстояния между объектом контроля и нагревателем, плотность нагрева уменьшается. Выбросы на графике объясняются тем, что при получении данных угол отражения сигнала было невозможно соблюдать одинаковым, что связано с перемещением панели на определенные расстояния и человеческим фактором.

Для исследований были изготовлены дефектные области, пересекающие четыре цветовые области в сотовой панели. Подобные сотовые панели применяются в авиастроении. Схематичное изображение дефектной области показано на рисунке 81.

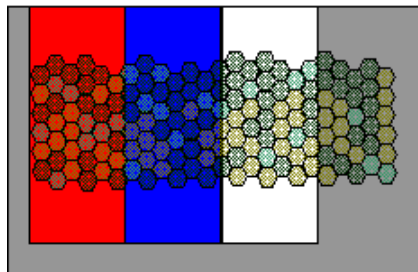


Рисунок 81 – Примерный вид дефектной области панели

Далее были получены последовательности термограмм на определенных расстояниях и значения отношения сигнал/шум при однократном нагреве длительностью 10 секунд, в качестве источника нагрева были использованы четыре галогенные лампы мощностью 500 Вт каждая.

Далее проведен эксперимент с применением периодического нагрева, со следующими параметрами: нагрев – 2 с, остывание – 2 с, количество циклов – 5, что соответствует энергетической мощности первого эксперимента.

На сегодняшний день применение периодического контроля при АТНК активно исследуется в разных странах, что можно подтвердить различными источниками информации. Например, написана целая книга под названием «Lock-in Thermography», авторами которой являются O. Breitenstein, W. Warta и M. Langenkamp. Так же в электронных источниках можно найти статьи, посвященные так же периодическому или импульсному нагреву, например, статья «Multi-Wave and Hybrid Imaging Techniques: A New Direction for Nondestructive Testing and Structural Health Monitoring», которая написана студентами из Китая и США, статья «Infrared Thermal Wave Imaging for Nondestructive Testing of Fibre Reinforced Polymers», авторами которой являются J. A. Siddiqui, V. Arora, R. Mulaveesala, A. Muniyappa, статья «Quadratic Frequency Modulated Thermal Wave Imaging for Non-destructive Testing», которая написана студентами из Индии.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

На сегодняшний день, проектируя новые разработки, проводя эксперименты, необходимо оценивать коммерческий потенциал и перспективность работ со стороны ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Цель данного раздела – оценка перспективности проведения исследований возможности активного теплового неразрушающего контроля (АТНК) больших областей объекта обследования. Для достижения поставленной цели был произведен FAST-анализ.

5.1 FAST-анализ

FAST-анализ основан на том, что затраты на создание и использование любого объекта состоят из необходимых и дополнительных излишних затрат, возникающих по различным причинам, например, при несовершенстве конструкции, технологических процессов, применяемых материалов или методов. Данный анализ предполагает шесть стадий.

Первая стадия – выбор объекта FAST-анализа.

Объектом исследования работы являются изделия авиакосмической техники из композитных материалов. Объектом FAST-анализа является предмет исследования – особенности периодического нагрева для контроля больших площадей, т.е. метод исследования изделий из композитных материалов.

Вторая стадия – описание главной, основной и вспомогательной функций.

Главная функция – это функция, которая определяет назначение, сущность и главную цель создания объекта.

Главная функция объекта исследования – определение дефектов в изделиях больших размеров с меньшими трудозатратами и временными затратами.

Основная функция – это функция, отражающая действия внутри объекта, которая обеспечивает принцип его работы и создающая необходимые условия для осуществления главной функции. Данной функцией является функция получение результатов после исследования объекта контроля (ОК).

Вспомогательная функция – внутренняя функция, которая помогает реализовать основную функцию. Такой функцией является функция получения данных по реальному объекту.

В таблице 9 представлена классификация функций, которые выполняет объект исследования.

Таблица 9 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Метод исследования (периодический нагрев ОК)	—	Определение дефектов в изделиях	X		
Объект контроля	—	Содержание дефектов	X		
Стеклопластик 1	2	1. Содержит необходимые свойства 2. Базовая деталь ОК		X	

Продолжение таблицы 9

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Стеклопластик 2	8	1. Содержит необходимые свойства 2. Базовая деталь ОК		X	
Клей эпоксидный 1	—	Обеспечение дефекта		X	
Клей эпоксидный 2	3	Соединение пластин			X
Вода	—	Обеспечение дефекта		X	
Воздух	—	Обеспечение дефекта		X	
Серая бумага	1	Снижение влияния поверхности ОК			X
Скотч разноцветный	3	Имитация покраски деталей			X
Лампы галогенные	2	Нагрев ОК		X	

Продолжение таблицы 9

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Лампы светодиодные	2	Нагрев ОК		X	
Тепловизор	1	Запись результатов		X	
Блок управления	1	Управление лампами			X
Блок питания	1	Стабилизация напряжения			X
ПО	1	Управление тепловизором			X
Программа ThermoFit Pro	1	Обработка термограмм			X
Программа calc3d	1	Построение математических моделей			X
Программа MaskGenerator	1	Построение картины с шумовым эффектом			X

В данной таблице отражены все детали, входящие в объект исследования, а так же необходимые для обеспечения экспериментов с описанием их функционирования и их рангов. Данная классификация необходима, чтобы произвести оптимизацию объекта исследования. Это необходимо для повышения эффективности процесса с помощью снижения

стоимости объекта исследования и сохранения требуемого качества, при этом производя экономию путем снижения затрат на вспомогательные функции, что не повлечет за собой сильного снижения функционала объекта научного исследования.

Третья стадия – определение значимости выполняемых функций объектом.

На данной стадии применяется оценка значимости функций с помощью метода расстановки приоритетов. Основа метода – расчетно-экспертное определение значимости функций. Метод состоит из трех этапов.

На первом этапе происходит построение матрицы смежности функций. Данные представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Матрица смежности

	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 4	Ф 5	Ф 6	Ф 7	Ф 8	Ф 9	Ф 10	Ф 11	Ф 12	Ф 13	Ф 14	Ф 15	Ф 16	Ф 17	Ф 18
Ф 1	=	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ф 2	<	=	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ф 3	<	>	=	>	<	>	<	<	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ф 4	<	<	<	=	<	>	<	<	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ф 5	<	<	>	>	=	>	=	=	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ф 6	<	<	<	<	<	=	=	=	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ф 7	<	<	>	>	<	=	=	=	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ф 8	<	<	>	>	=	=	=	=	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ф 9	<	<	<	<	<	<	<	<	=	>	<	<	<	<	<	<	>	>
Ф 10	<	<	<	<	<	<	<	<	<	=	>	<	>	>	>	<	<	<

Продолжение таблицы 10

	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 4	Ф 5	Ф 6	Ф 7	Ф 8	Ф 9	Ф 10	Ф 11	Ф 12	Ф 13	Ф 14	Ф 15	Ф 16	Ф 17	Ф 18
Ф 11	<	<	<	<	<	<	<	<	>	<	=	>	<	<	>	>	>	>
Ф 12	<	<	<	<	<	<	<	<	>	>	<	=	>	>	<	>	>	>
Ф 13	<	<	<	<	<	<	<	<	>	<	>	<	=	<	<	<	>	>
Ф 14	<	<	<	<	<	<	<	<	>	<	>	<	>	=	<	<	>	>
Ф 15	<	<	<	<	<	<	<	<	>	<	<	<	>	>	=	>	>	>
Ф 16	<	<	<	<	<	<	<	<	>	>	<	<	>	>	<	=	>	>
Ф 17	<	<	<	<	<	<	<	<	<	>	<	<	<	<	<	<	=	>
Ф 18	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	=

Примечание: «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости; «>» – более значимая.

После построения матрицы смежности необходимо перейти ко второму этапу, а именно к преобразованию данной матрицы в матрицу количественных соотношений функций. Данные представлены в таблице А.1 в приложении А.

На третьем этапе необходимо определить значимость функций путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по функциям. Общая сумма рассчитанных коэффициентов должна быть равной единице. Данные представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Значимость функций

№ функции	Коэффициент
1	0,081
2	0,078
3	0,069

Продолжение таблицы 11

№ функции	Коэффициент
4	0,062
5	0,072
6	0,062
7	0,069
8	0,070
9	0,048
10	0,041
11	0,048
12	0,051
13	0,041
14	0,045
15	0,048
16	0,048
17	0,035
18	0,029
Итого:	1

Как видно из данных таблицы, суммарный коэффициент удовлетворяет главному условию, т.е. равен 1.

Четвертая стадия – анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования.

На данной стадии необходимо с помощью определенных методов оценить уровень затрат на выполнение каждой функции. В данной работе применяется нормативный метод. Данные представлены в таблице Б.1 в приложении Б.

Общая себестоимость всех функций составляет: 1776 руб.

Далее необходимо рассчитать относительные затраты на каждую функцию. Данные представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Относительные затраты на функцию

№ функции	Относительные затраты
1	0
2	0
3	0,086
4	0,085
5	0,17
6	0,31
7	0,035
8	0
9	0,16
10	0,12
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0

Пятая стадия – построение функционально-стоимостной диаграммы.

Необходимо построить диаграмму, на которой будет отражена диспропорция между важностью функций и затратами на них. Диаграмма представлена на рисунке 86.

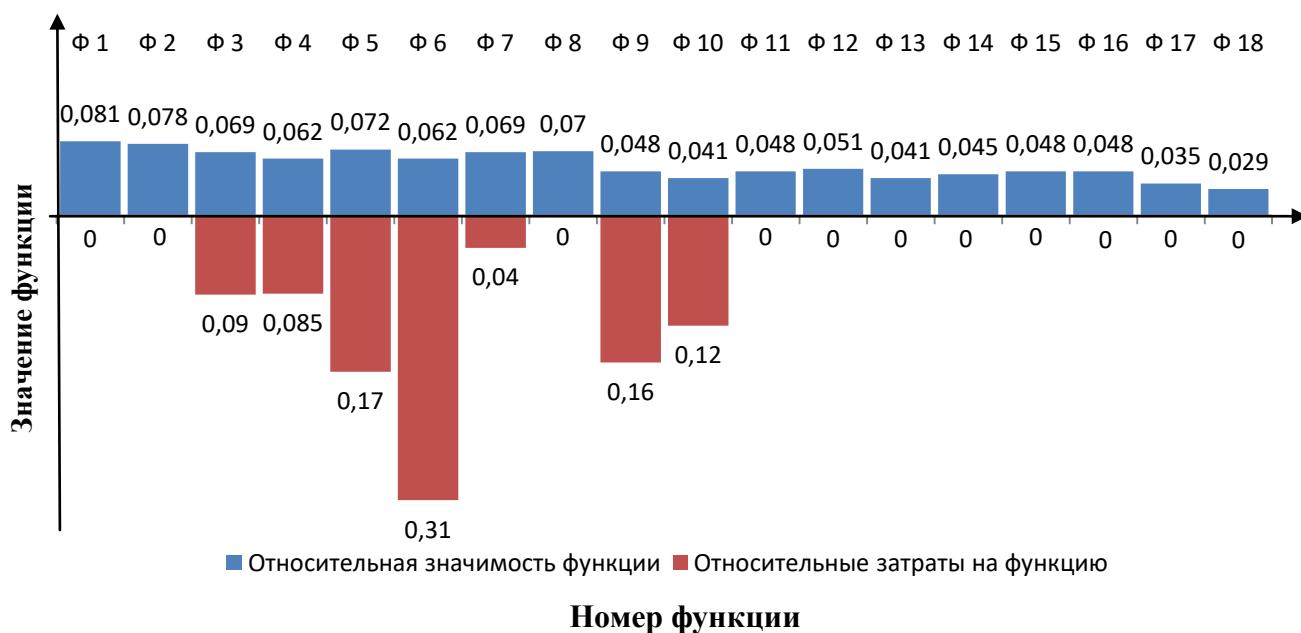


Рисунок 86 – Функционально-стоимостная диаграмма

где Ф1-Ф18 – обозначения функций.

По данной диаграмме можно сделать вывод о том, что существует явное не согласование между важностью функций №5,6,9,10 и затратами на них.

Шестая стадия – оптимизация функций выполняемых объектом.

На данном этапе необходимо предложить определенные шаги, которые позволят провести экономию затрат на функции.

Проанализировав функционально-стоимостную диаграмму, можно предложить следующее: при изготовлении объекта контроля воспользоваться менее дорогим эпоксидным клеем, бумагу и скотч выбрать более дешевые материалы, либо заменить другими элементами.

При выполнении данного раздела был проведен FAST-анализ, в результате которого был выбран объект данного анализа, описаны главная, основная и вспомогательная функции объекта, определена значимость данных функций, проведен анализ стоимости функций, построена функционально-стоимостная диаграмма объекта, предложены шаги по уменьшению затрат на изготовление объекта контроля.

Таблица А.1 – Матрица количественных соотношений функций

[illegible]

Продолжение таблицы А.1

	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 4	Ф 5	Ф 6	Ф 7	Ф 8	Ф 9	Ф 10	Ф 11	Ф 12	Ф 13	Ф 14	Ф 15	Ф 16	Ф 17	Ф 18	Итого
Ф 8	0,5	0,5	1,5	1,5	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	23
Ф 9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	15,5
Ф 10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	13,5
Ф 11	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	15,5
Ф 12	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	1	1,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	16,5
Ф 13	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	13,5
Ф 14	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	1	0,5	0,5	1,5	1,5	14,5
Ф 15	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1	1,5	1,5	1,5	15,5

Продолжение таблицы А.1

	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 4	Ф 5	Ф 6	Ф 7	Ф 8	Ф 9	Ф 10	Ф 11	Ф 12	Ф 13	Ф 14	Ф 15	Ф 16	Ф 17	Ф 18	Итого
Ф 16	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	1	1,5	1,5	15,5
Ф 17	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,5	11,5
Ф 18	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	9,5
																			Σ=325,5

Примечание: 0,5 при «<»; 1,5 при «>»; 1 при «=»

Таблица Б.1 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-час	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Метод исследования (периодический нагрев ОК)	—	Определение дефектов в изделиях	—	—	—	—	—
Объект контроля	—	Содержание дефектов	—	—	—	—	—
Стеклопластик 1	2	1. Содержит необходимые свойства 2. Базовая деталь ОК	0,34	—	220	85	305

Продолжение таблицы Б.1

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо- час	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Стеклопластик 2	8	1. Содержит необходимые свойства 2. Базовая деталь ОК	0,095	—	220	85	305
Клей эпоксидный 1	—	Обеспечение дефекта	0,12	—	201	150	351
Клей эпоксидный 2	3	Соединение пластин	0,2	—	336	220	556
Вода	—	Обеспечение дефекта	—	—	—	63	63
Воздух	—	Обеспечение дефекта	—	—	—	—	—

Продолжение таблицы Б.1

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-час	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Серая бумага	1	Снижение влияния поверхности ОК	—	—	265	27	292
Скотч разноцветный	3	Имитация покраски деталей	—	—	192	17	209
Лампы галогенные	2	Нагрев ОК	—	—	—	—	—
Лампы светодиодные	2	Нагрев ОК	—	—	—	—	—
Тепловизор	1	Запись результатов	—	—	—	—	—

Продолжение таблицы Б.1

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-час	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Блок управления	1	Управление лампами	—	—	—	—	—
Блок питания	1	Стабилизация напряжения	—	—	—	—	—
ПО	1	Управление тепловизором	—	—	—	—	—
Программа ThermoFit Pro	1	Обработка термограмм	—	—	—	—	—
Программа calc3d	1	Построение математических моделей	—	—	—	—	—
Программа MaskGenerator	1	Шумовой эффект	—	—	—	—	—

Список публикаций студента

1. Статья «Измерение параметров дефектов сложной формы в активном тепловом неразрушающем контроле». Авторы: А. А. Разумова, В. В. Ширяев; науч. рук. В. В. Ширяев // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 25-29 мая 2015 г.: в 2 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Т. 1. — [С. 348-352]
2. Статья «Влияние толщины изделия на определение глубины дефекта при активном тепловом неразрушающем контроле». Авторы: А. А. Разумова, В. В. Ширяев // Информационно-измерительная техника и технологии материалы VI научно-практической конференции, Томск, 27-30 мая 2015 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. А. В. Юрченко. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — [С. 172-181]
3. Статья «Тепловой контроль сотовых панелей с помощью периодического нагрева». Автор: А. А. Разумова; науч. рук. В. В. Ширяев // Наука Технологии Инновации, Новосибирск, 5-9 декабря 2016 г. : / Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). — Т. 1. — [С. 52-54]
4. Статья «Определение температуропроводности композитных материалов при активном тепловом неразрушающем контроле». Авторы: А. А. Разумова, В. В. Ширяев; науч. рук. В. В. Ширяев // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее сборник научных трудов IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, г. Томск. 5-10 октября 2015 г.: в 3 т.: / Национальный исследовательский Томский

- политехнический университет (ТПУ) . — 2015 . —Т. 1. — [С. 171-173]
5. Статья «Сравнение методов активного теплового неразрушающего контроля воды в сотовых панелях». Авторы: А. А. Разумова, В. В. Ширяев; науч. рук. В. В. Ширяев // Неразрушающий контроль сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», Томск, 23-27 мая 2016 г.: в 3 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2016 . —Т. 1. — [5 с.]
 6. Статья «Тепловой контроль сотовых панелей с применением периодического нагрева». Авторы: А. А. Разумова, Люй Цзинье, В. В. Ширяев; под ред. В. В. Ширяев // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее сборник научных трудов V Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, г. Томск. 3-8 октября 2016 г.: в 3 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2016 . —Т. 1. — [С. 172-176]
 7. Статья «Определение дефектов в сотовой панели с помощью термоволнового контроля при различных источниках нагрева». Авторы: А. А. Разумова, А. О. Чулков; науч. рук. В. В. Ширяев // Инженерия для освоения космоса сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — Томск : Изд-во ТПУ , 2016 . — [С. 158-161]
 8. Статья «Die bestimmung der defekte in den verbundwerkstoffenmit hilfe der thermowellenkontrolle». Автор: А. А. Razumova; lingv. E. Prokhorets; wiss. Betr. V. Schirjaev // Инженерия для освоения космоса сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с

международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г.: /
Национальный исследовательский Томский политехнический
университет (ТПУ). — Томск : Изд-во ТПУ , 2016 . — [С. 307-309]