

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

Институт	Неразрушающего контроля
Направление подготовки	Приборостроение
Кафедра	ФМПК

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка метода активного теплового контроля ударных повреждений в авиационных композитах

УДК 620.179.1:620.178.7:629.73.023.2:678.5.067

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Еганов Виктор Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лабораторией	Вавилов В.П.	д.т.н., профессор		

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.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав.кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржигов А.П.	д.ф.-м.н.		

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>

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 – Приборостроение
Кафедра ФМПК

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ Суржиков А.П.

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Еганову Виктору Александровичу

Тема работы:

Разработка метода активного теплового контроля ударных повреждений в авиационных композитах	
Утверждена приказом директора ИНК (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Контролируемые материалы: стекло- и углепластик Толщина 6 мм Диапазон энергий повреждения: от 5 до 45 Дж Определяемые характеристики: температуропроводность, тепловая инерция Метод контроля: тепловой Тепловизор: NEC TH-9100 Источник нагрева: галогеновые лампы 2x1 кВт
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Обзор существующих методов и средств контроля дефектов в композиционных материалах. 2. Монтаж экспериментальной установки. 3. Проведение испытаний образцов композитов путем определения ТФХ. 4. Анализ экспериментальных зависимостей.

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Графики зависимости тепловой инерции или теплопроводности от энергии повреждения углепластиковых и стеклопластиковых композитных стандартных образцов в диапазоне энергий от 5 до 45 Дж.
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Анищенко Юлия Владимировна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич
Иностранный язык	Вебер Юлия Юрьевна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Литературный обзор

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Вавилов В.П.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Еганов Виктор Александрович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5А	Еганову Виктору Александровичу

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	Приборостроение

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	1. Потенциальные потребители результатов исследования 2. Анализ конкурентных технических решений 3. SWOT-анализ 4. Оценка готовности проекта к коммерциализации
2. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1. <i>Оценка абсолютной эффективности исследования;</i>
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 В.С.	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Еганов В.А.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 1БМ5А	ФИО Еганову Виктору Александровичу
-----------------	---------------------------------------

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Рабочим оборудованием является NEC 9100 – тепловизор, который предназначен для дистанционного контроля температуры изделий и обнаружение наличия дефектов типа нарушения сплошности, определения координат дефектов.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.	Рабочий процесс проводится в научной лаборатории, где могут быть такие вредные факторы как: отклонение показателей микроклимата, повышенный уровень инфракрасной радиации, недостаточная освещенность рабочей зоны. В ходе выполнения работы возможно поражение электрическим током.
2. Экологическая безопасность	Во время проведения исследования и по его окончании не существуют источников загрязнения окружающей среды.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Возможно возникновение пожара.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Допускаются к работе с устройством лица не моложе 18 лет, не имеющие противопоказаний по здоровью, прошедшие инструктаж по технике безопасности и пожарной безопасности. Рациональная планировка рабочей зоны, требования к основным элементам рабочего места: рабочий стол, рабочий стул, тепловизор NEC 9100, углепластиковые образцы, галогенная лампа.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5А	Еганов Виктор Александрович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 80 с., 20 рис., 15 таблиц, 21 источник, 1 приложение.

Ключевые слова: композиционные материалы, тепловой неразрушающий контроль, температуропроводность, тепловая инерция, углепластик, стеклопластик.

Объектом исследования является зависимость температуропроводности или тепловой инерции от энергии удара полученного композиционным материалом.

Цель работы – исследование зависимости изменения тепловой инерции либо температуропроводности от энергии удара в композитах. Более конкретно установить зависимости, из которых можно определять степень серьезности полученного повреждения по известной тепловой инерции или температуропроводности.

В процессе работы проводились:

- исследование основных методов контроля ударных повреждений композиционных материалов;
- проведение экспериментальных исследований при помощи установок для одностороннего и двухстороннего активного теплового контроля композиционных материалов;
- обработка результатов эксперимента;
- построение зависимости тепловой инерции или температуропроводности от энергии удара.

В результате исследования получены зависимости вышеуказанных теплофизических характеристик от энергии удара при одно- и двухстороннем тепловом контроле на примере испытаний стекло- и углепластиковых стандартных образцов в диапазоне энергий от 5 до 45 Дж.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
2. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение.
4. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.
5. ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
6. ГОСТ 12.2.007.0-75 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические.
7. ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Тепловой неразрушающий контроль – метод (вид) неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на регистрации и анализе температурных сигналов на поверхности объектов контроля, которые, как правило, возникают в результате тепловой стимуляции материала.

Температуропроводность (коэффициент температуропроводности) - справочная характеристика материала, характеризующая скорость изменения температуры материала в условиях нестационарного теплообмена, м²/с.

Тепловая инерция – совокупность свойств материала, связанных с теплопроводностью и объёмной теплоёмкостью. Тепловая инерция

характеризует способность сопротивляться изменению температуры за определённое время.

Сокращения

ТК – тепловой контроль

ТФХ – теплофизические характеристики

НК – неразрушающий контроль

Оглавление

РЕФЕРАТ	8
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки.....	9
Введение.....	12
1. Обзор литературы	14
1.1. Краткая история ТК.....	14
1.2. Активный тепловой контроль	15
1.2.1. Термография – принцип работы	18
1.2.2. Импульсный нагрев.....	18
1.2.3. Импульс конечной длительности	19
1.2.4. Синхронная термография	19
1.2.5. Вибро-термография.....	19
1.2.6. Преимущества активной термографии для неразрушающего контроля	20
1.2.7. Развитие активного ТК.....	21
1.3. Композитные материалы	23
1.3.1. Типы композиционных материалов	26
1.3.2. Применение композиционных материалов	30
1.4. Виды дефектов в композиционных материалах.....	33
1.4.1. Заводской брак.....	33
1.4.2. Дефекты, полученные во время эксплуатации.....	36
1.5. Методы контроля композиционных материалов.	38
1.5.1. Визуально - измерительный метод	38
1.5.2. Ультразвуковые методы контроля.....	38
1.5.3. Теневой эхо-метод.....	39
1.5.4. Эхо-метод	40
1.5.5. Радиационный метод.....	41
1.5.6. Тепловой метод.....	42
2. Объект и методы исследования.....	43
2.1. Описание объекта исследования.....	43
2.2. Описание тепловизионных систем	44
2.3. Описание источников нагрева.....	46
2.4. Обработка экспериментальных данных	48

3. Экспериментальная часть	48
3.1. Результаты	49
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	56
4.1. SWOT-анализ.....	57
5. Социальная ответственность	65
5.1. Производственная безопасность	65
5.1.1. Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.....	65
5.1.2. Недостаточная освещенность рабочей зоны	67
5.1.3. Повышенный уровень инфракрасной радиации.	68
5.1.4. Поражение электрическим током	69
5.1.5. Электромагнитное излучение.....	71
5.2. Экологическая безопасность	72
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	72
5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	73
5.4.1. Правовые вопросы обеспечения безопасности	73
5.4.2. Организационные вопросы обеспечения безопасности	73
Заключение	76
Список публикаций.....	78
Список литературы.....	79

Введение

Доля композиционных материалов (составная структурная масса), используемых в гражданском авиастроении, экспоненциально возрастает с 1970-х годов и достигает 50% на самолетах В787, А350. В армии эта цифра почти достигла физического предела: более 82% панелей фюзеляжа изготовлено из композитов. Соответственно, количество разрушений материалов, связанных с композитами, в настоящее время составляет около 50%. Композиты характеризуются некоторыми типичными дефектами, которые могут возникать как при производстве, так и при эксплуатации или ремонте. Это расслоения, ожоги в результате удара молнии, а также места проникновения воды и ударные повреждения, которые появляются во время эксплуатации. Поэтому в авиации, стратегия технического обслуживания включает в себя переработку, проверку работоспособности и текущий ремонт. Во всех этих случаях роль неразрушающего контроля нельзя недооценивать.

Тепловой контроль (ТК) стал признанным инструментом неразрушающего контроля в аэрокосмической области. В авиации практические исследования остаются довольно качественными. Это обусловлено отсутствием фундаментальных исследований, направленных на установление количественных взаимосвязей между степенью тяжести дефекта и выбранными параметрами принятия решений. Стоит отметить, что сама температура является довольно уязвимым параметром, подверженным множеству факторов, создающих шум, прежде всего, неравномерному нагреву. Таким образом, очевидная современная тенденция в области теплового неразрушающего контроля (ТНК) - это обработка данных во временных / фазовых областях, где многие шумовые факторы могут быть значительно подавлены. В этом исследовании основное внимание уделяется разработке двух типов количественных методов ТНК: картирование тепловой инерции (односторонняя процедура) и температуропроводности (двухсторонняя процедура) [1].

1. Обзор литературы

1.1. Краткая история ТК

Тепловой контроль представляет собой одну из областей промышленного применения ИК термографии, история которой начинается с 1930х гг., когда Д. Никольс предложил оценивать качество горячего проката путем исследования поверхностного температурного поля, а П. Верно разработал динамическую процедуру определения теплофизических свойств человеческой кожи. В 1960е годы тепловидение начали применять для инспекции электрических установок и радиоэлектронных компонент. Одна из первых процедур активного ТНК, т.е. с использованием внешней тепловой стимуляции объектов контроля, была предложена в 1965 г. У. Беллером при испытаниях корпусов ракет «Поларис». В 1967 г. Д. Грин выполнил базовые исследования по ТНК ТВЭЛов, в которых существенное внимание было уделено решению проблемы коэффициента излучения. В те же годы, с началом космической гонки и расширенного применения композиционных материалов, тепловой контроль привлек интерес специалистов авиакосмической отрасли, в результате чего при Американском обществе неразрушающего контроля (ASNT) был образован Комитет ИК контроля. К концу 1970х гг. ТНК опирался в основном на ИК технологию и не располагал собственной теоретической базой. Конкурентоспособность этого метода повысилась после внедрения «теплофизического» подхода, основанного на использовании методов теории теплопроводности. Основы этой теории были обобщены на Западе в ставшей «библией» теплофизиков книге Г. Карслоу и Д. Егера [2] и ее российским аналоге монографии А.В. Лыкова [3]. Решения ряда одно, двухи трехмерных задач активного ТНК были получены в те годы Д. Балажа [4], В.П. Вавиловым и Р. Тейлором [5], П. Маклаfliном и Г. Мирчандани [6], Ю.А. Поповым и А.Е. Карпельсоном [7] и др. В технической диагностике преимущества ИК термографии оказались бесспорными, в то время как активный ТНК испытывал периоды подъема и спада. Растущий интерес к этому методу в последние годы

обусловлен взрывообразным расширением номенклатуры тепловизоров и достижениями в области компьютерной обработки результатов контроля [8].

Тепловой контроль – один из видов неразрушающего контроля, предназначенный для исследования изделий посредством наблюдения (визуализации) неоднородностей в тепловых потоках, вызываемых внутренними дефектами. Тепловой метод применяется в тех отраслях промышленности, где по неоднородности теплового поля можно судить о техническом состоянии контролируемых объектов.

В настоящее время метод ТК стал одним из наиболее востребованных в теплоэнергетике, строительстве, промышленном производстве и аэрокосмической отрасли.

Основными достоинствами ТК являются: универсальность, высокая точность оценки температурных сигналов, оперативность, высокая производительность, дистанционный характер испытаний. Основной недостаток активного теплового контроля: наличие специфических шумов, обусловленных как самим объектом контроля (флуктуации оптических свойств), так и внешними тепловыми источниками.

Условно различают пассивный и активный ТК. Пассивный ТК не нуждается во внешнем источнике теплового воздействия, в то время как активный ТК предполагает нагрев объекта внешними источниками. Активный метод ТК применяется в тех случаях, когда объект испытаний характеризуется однородным температурным полем (чаще всего, равным температуре окружающей среды). При активном методе ТК, объект нагревают различными внешними источниками. Типичными объектами, контролируемые данным методом многослойные композитные материалы, объекты искусства и другие объекты, требующие внешней тепловой нагрузки. [9]

1.2. Активный тепловой контроль

Активная термография – относительно новый, но высокоэффективный и информативный метод неразрушающего контроля широко применяемый в

аэрокосмической промышленности. Особое внимание уделяется контролю композитов, т.к. у активного ТК много преимуществ.



Рисунок 1 – установка для активного теплового контроля композиционных материалов.

Использование композитов быстро развивается в области проектирования и производства самолетов. Для военных и спортивных самолетов композиты являются незаменимым материалом. В коммерческой авиации эта тенденция привела к появлению самолетов нового поколения, таких как Boeing 787 и Airbus A350 с очень высоким содержанием основных конструктивных элементов, изготовленных из углеродных композитов.



Рисунок 2 – устройство для активного теплового контроля самолетов
(Automation Technology, Германия)

Хотя для разработчиков преимущества, связанные с использованием композитов очевидны, эти материалы преподносят много новых задач для специалистов по проверке и обслуживанию. Чтобы обеспечить высокие стандарты безопасности и экономическую эффективность, требуются передовые методы неразрушающего контроля, которые отвечают множеству требований. К ним относятся: точное выявление различных дефектов, характерных для композитов; легкая работоспособность; быстрый осмотр больших площадей; проверка без необходимости длительной разборки и без необходимости специальных установок; легкий анализ результатов контроля независимо от опыта дефектоскописта (меньшая зависимость от «человеческого фактора») и легкая архивация результатов для отслеживания динамики изменений.

Как правило, эти требования могут выполняться системами, основанными на активном ТК. В последние годы были предприняты большие усилия, чтобы улучшить этот метод и сделать его удобным для пользователя. В

аэрокосмической промышленности активная термография используется во всём большем числе исследований в качестве основного метода неразрушающего контроля. Хотя в прошлом термографическое оборудование было очень дорогим, однако разработанные в последнее время переносные системы теперь доступны по цене хорошего ультразвукового испытательного оборудования.

1.2.1. Термография – принцип работы

Активный ТК основана на индуцировании теплового потока на объект контроля. Это можно сделать либо путем приложения энергии в импульсной форме (импульсная термография), либо гармонически модулированным способом. Распространение теплового потока внутри объекта непосредственно влияет на изменение температуры поверхности. Записав температуру поверхности с помощью инфракрасной камеры и применив соответствующий математический анализ, получено изображение, которое показывает внутреннюю структуру детали с дефектами. Активная термография предлагает различные методы контроля, а также различные методы измерения. Таким образом, процедура измерения может быть оптимально приспособлена к различным материалам и частям с различными структурными свойствами. Методы контроля в основном различаются по типу используемого источника возбуждения, способу применения тепловой энергии и математическому анализу.

1.2.2. Импульсный нагрев

С помощью метода импульсной термографии на измеряемый объект подается короткий энергетический импульс. Чаще всего используются мощные импульсные ксеноновые лампы. В основном применяются для контроля тонкостенных композитов или характеристики верхних слоев композитных панелей. Основными преимуществами этого метода являются короткие сроки проверки (<1 с, до нескольких секунд) и способность определять глубину дефектов.

1.2.3. Импульс конечной длительности

Принцип измерения аналогичен принципу импульсной термографии. Однако здесь применяется прямоугольный импульс в течение более длительного периода времени. Это позволяет использовать недорогие источники возбуждения, такие как галогенные лампы или технические фены. Время контроля короткое и можно определить глубину дефектов. Активный ТК с равномерным нагревом является особенно подходящим методом контроля композитных материалов. Это справедливо для обеспечения качества в процессе производства, а также для диагностики композитов в процессе эксплуатации. В частности, в тонкостенных композитных панелях могут обнаруживаться дефекты, которые трудно обнаружить при использовании классических методов контроля.

1.2.4. Синхронная термография

С помощью синхронной термографии поверхность испытываемого объекта будет нагреваться периодическим гармоническим модулированным импульсом. Типичными источниками возбуждения являются, например, обычные галогенные лампы или технические фены. Диапазон глубины может быть установлен через частоту модуляции источника возбуждения, чтобы получить наилучший возможный результат. По сравнению с равномерным нагревом время измерения значительно больше.

1.2.5. Вибро-термография

С помощью этого метода ультразвук используется как источник энергии, который контактно воздействует на объект контроля. Ультразвуковая энергия преобразуется в тепло путем трения в местах дефектов, где присутствуют трещины или расслоения. Поэтому дефекты действуют как внутренние источники тепла, в то время как неповрежденные участки практически не увеличивают температуру. Это дает селективный отклик дефекта (метод темного поля), то есть только дефекты отображаются с высоким

контрастом в результирующем изображении, что позволяет легко идентифицировать их. Другим преимуществом является диапазон глубины этого метода. Однако вибротермография не является бесконтактным методом, так как источник ультразвуковой энергии должен контактировать с поверхностью или компонентом, подлежащим обследованию.

1.2.6. Преимущества активной термографии для неразрушающего контроля

Классические методы контроля, такие как ультразвук, по-прежнему широко используются для контроля композитных конструкций на самолетах. Помимо других ограничений, таких как зависимость результатов контроля от опыта дефектоскописта, эти методы не позволяют сканировать большие площади экономически эффективным способом. Методы контроля для сканирования большой площади, такие как сканирующая акустическая микроскопия, на самом деле не пригодны для практического использования. В основном это связано с высокой сложностью и ограничениями для контроля на борту воздушных судов.

По сравнению с этими методами активный ТК дает много преимуществ. Он позволяет проводить контроль большой площади, который выполняется бесконтактно и быстро. Результаты контроля представлены в виде термограмм с высоким разрешением, которые обеспечивают легкую интерпретацию и простую и эффективную форму представления результатов контроля. Современные системы контроля просты в эксплуатации и не обязательно требуют проведения измерений опытным дефектоскопистом.

Кроме того, легко варьировать размер контролируемой части. Единичное измерение может занимать площадь в несколько квадратных метров. Однако детали, которые имеют размер всего в несколько миллиметров, также могут быть проверены. Время измерения невелико - измерение на тонкой части обычно занимает всего несколько секунд.

В прошлом, системы НК, основанные на активной термографии, в основном были предназначены для лабораторного использования. Из-за спроса на нестационарный контроль, на рынке появились мобильные системы активного ТК.

1.2.7. Развитие активного ТК

Недавно был создан важный ориентир для разработки эффективной системы контроля композитов «под ключ», простой в эксплуатации и более доступный. Airbus нуждалась в системе, которая была бы мобильной и простой в использовании для быстрого осмотра больших зон композитных деталей на своем самолете, для обнаружения и маркировки мест, требующих ремонта и для дальнейшей оценки результатов неразрушающего контроля. Прежде всего, система должна быть очень проста в эксплуатации, чтобы контроль могли выполнять сотрудники авиакомпаний на месте, а не сторонними организациями.

Из-за высоких требований компания Airbus провела очень тщательный анализ различных доступных методов неразрушающего контроля, чтобы определить, какой из них будет наиболее эффективным. Среди различных методов была рассмотрена ультразвуковая фазированная решетка, но она оказалась слишком сложной в применении, измерения были слишком длительными, а анализ результатов контроля слишком сильно зависел от интерпретации оператором. В конце концов Airbus выбрал активную термографию как наиболее подходящий метод, но обнаружил, что на рынке нет системы, которая могла бы удовлетворить все ее первоначальные требования. Поэтому Airbus решила начать разработку такой системы контроля.

Окончательная система состоит только из двух компонентов: измерительной части и планшетного компьютера. Измерительная часть содержит высокочувствительную инфракрасную камеру, а также источник тепла (галогенную лампу). Все эти компоненты смонтированы на раме, которая содержит три опоры с вакуумными присосками. Присоски предназначены для

крепления измерительной головки к поверхности объекта, подлежащего проверке. Это позволяет проводить осмотр на горизонтальных и вертикальных поверхностях.

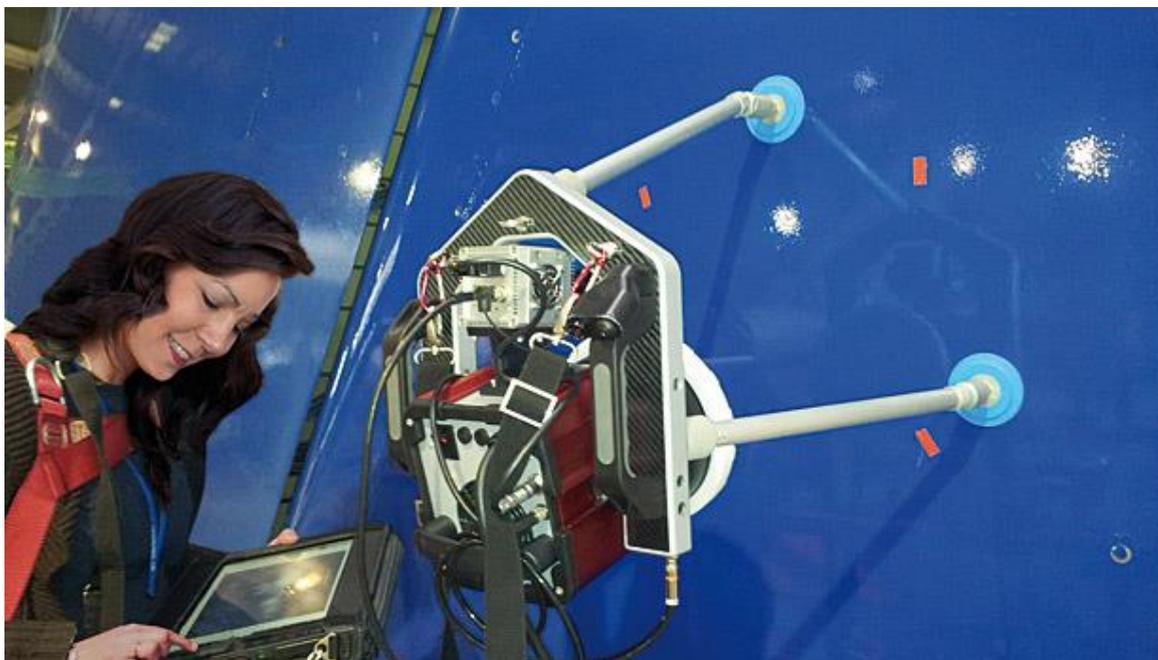


Рисунок 3 – Система активного теплового контроля

Производительность системы и требуемое время проверки проверялись в ходе серии испытаний персоналом без опыта работы в сфере неразрушающего контроля. Во время этих испытаний, крыло самолёта аэробуса A320 было проверено всего за 2,5 часа.

По сравнению с другими методами неразрушающего контроля, новая система дает значительные преимущества с точки зрения удобства для пользователя, требуемого времени проверки и требуемой квалификации персонала. Именно поэтому Airbus планирует усовершенствовать и использовать эту новую систему для других задач контроля композитных материалов.

В ближайшем будущем оперативное использование самолетов нового поколения, таких как B787 и A350, поставит новые задачи для аэрокосмического неразрушающего контроля. Одним из примеров является вопрос о том, как весь фюзеляж Боинга 787 может быть проверен на предмет

повреждений во временной и экономически эффективной форме во время техобслуживания. Кроме того, типичные повреждения при активной эксплуатации, такие как удар птицы, удар молнии, удар предметов во время взлета или посадки, или столкновение с наземным транспортным средством также создают зоны, которые необходимо проконтролировать на наличие дефектов. Эти инциденты требуют немедленной и надежной оценки на месте, чтобы избежать дорогостоящих периодов простоя. Ультразвук с фазированной решеткой может быть опцией, однако для этого метода требуется высококвалифицированный персонал НК, который часто не может быть доступен в месте происшествия. Активная термография же дает преимущество простоты использования, что позволяет менее квалифицированному персоналу выполнять измерения. Поскольку результаты измерений доступны в виде цифровых изображений, их можно отправить экспертам по всему миру для их надежной оценки.

Также обсуждается вопрос об осуществлении дистанционного контроля. Здесь персонал на месте будет просто отвечать за работу системы контроля, в то время как измерение и оценка будут осуществляться дистанционно экспертом, подключенным через Интернет [10].

1.3. Композитные материалы

Композит (композиционный материал) представляет собой материал, изготовленный из двух или более компонентов, с четкой границей раздела между ними, значительно отличающимися физическими или химическими свойствами, которые в сочетании образуют материал с характеристиками, отличными от их характеристик по отдельности. Компоненты можно разделить на матрицу и наполнители (армирующие элементы). Наполнители обычно обеспечивают необходимые механические характеристики материала (прочность, жесткость и т. д.), а матрица обеспечивает совместную работу армирующих элементов и защиту их от механических повреждений и агрессивной химической среды. Изменив состав матрицы и наполнителя,

ориентацию наполнителя, их соотношение, можно получить широкий спектр материалов с необходимым набором свойств. Основными преимуществами композиционных материалов являются их высокая прочность и жесткость в сочетании с низкой плотностью, по сравнению с традиционными материалами, это позволяет снизить вес готовой детали и приводит к улучшению её механических характеристик.

В большинстве случаев армированные элементы жестче, сильнее и прочнее, чем у матрицы. Наполнитель обычно представляет собой волокно или частицы. Размер частиц твердых частиц примерно одинаковый во всех направлениях. Они могут быть сферическими, тромбоцитами или любой другой постоянной или непостоянной формы. Частицы композитов, как правило, гораздо слабее и менее жесткие, чем непрерывные волокна композитов, но они, как правило, гораздо дешевле.

Композиционные материалы с непрерывным волокном обычно имеют определённую однонаправленную ориентацию, в то время как прерывистые волокна обычно имеют случайную ориентацию. Как правило, чем меньше диаметр волокна, тем выше его прочность, но часто стоимость увеличивается по мере уменьшения диаметра. Кроме того, высокопрочные волокна меньшего диаметра обладают большей гибкостью и более поддаются процессам изготовления. Типичные волокна, такие как стекло, арамид и углерод, могут быть непрерывными или прерывистыми.

Непрерывной фазой является матрица, которая представляет собой полимер, металл или керамику. Полимеры имеют низкую прочность и жесткость, металлы имеют промежуточную прочность и жесткость, но обладают высокой пластичностью, а керамика обладает высокой прочностью и жесткостью, но она хрупкая. Матрица (непрерывная фаза) выполняет несколько критических функций: монолитность композита, фиксирует форму изделия и взаимное расположение армирующих нитей, распределяет действующие напряжения по объему материала, обеспечивая равномерную нагрузку на волокна и её перераспределение при разрушении части волокна. В

керамических матричных композитах целью часто является увеличение прочности, а не прочности и жесткости. Поэтому желательно иметь низкую связь межфазной прочности. Окончательные свойства определяются типом и количеством наполнителя. Наибольшая прочность и упругость получаются с композитами из непрерывного волокна. Существует практический предел наполнения композита армирующими элементами, приблизительно 70%, при более высоком проценте слишком мал объем матрицы для эффективной поддержки волокон.

Теоретическая прочность композитов с разрывными волокнами может приближаться к композитам из непрерывных волокон, если их отношения размеров достаточно велики и они выровнены, но на практике трудно поддерживать хорошее выравнивание с непрерывными волокнами. Однако композитные материалы с разрывными волокнами обычно намного дешевле, чем композиты с непрерывным волокном. Поэтому композиты непрерывного волокна используются там, где на первом месте стоит более высокая прочность и жесткость (но по более высокой цене), а композиты с разрывными волокнами используются там, где стоимость является основным фактором, а прочность и жесткость менее важны. Обработка, тип усиления и матрица влияют на обработку. Существует два типа полимерных матриц: термореактивные и термопластические. Термореактивный материал формируется из смолы низкой вязкости, которая вступает в реакцию и отверждается во время обработки, образуя труднообрабатываемое твердое вещество. Термопластик - высоковязкая смола, которую обрабатывают нагреванием выше его температуры плавления. Поскольку термореактивная смола формируется и отверждается во время обработки, она не может быть повторно обработана путем повторного нагрева. Для сравнения, термопластик можно повторно нагревать выше его температуры плавления для дополнительной обработки. Поскольку металлические и керамические матричные композиты требуют очень высоких температур, а иногда и высоких давлений для обработки, они обычно намного дороже, чем композиты из полимерной матрицы. Тем не

менее, они имеют гораздо лучшую термическую стабильность, и хороши там, где композит подвергается воздействию высоких температур [11].

1.3.1. Типы композиционных материалов

Рассмотрим несколько типов наиболее распространённых полимерных композиционных материалов:

Стеклопластики — вид композиционных материалов — пластические материалы, состоящие из стекловолоконного наполнителя (стеклянное волокно, волокно из кварца и др.) и связующего вещества (термореактивные и термопластичные полимеры).

Стеклопластик — материал с малым удельным весом и заданными свойствами, имеющий широкий спектр применения. Стеклопластики обладают очень низкой теплопроводностью (примерно, как у дерева), прочностью как у стали, биологической стойкостью, влагостойкостью и атмосферостойкостью полимеров, не обладая недостатками, присущими термопластам.

Стеклопластики уступают стали по абсолютным значениям предела прочности, но в 3,5 раза легче её и превосходят сталь по удельной прочности. При изготовлении равнопрочных конструкций из стали и стеклопластика, стеклопластиковая конструкция будет в несколько раз легче. Коэффициент линейного расширения стеклокомпозита близок к стеклу (составляет $11-13 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$), что делает его наиболее подходящим материалом для светопрозрачных конструкций. Плотность стеклопластика, полученного путём прессования или намотки, составляет $1,8-2,0 \text{ г/см}^3$.

До недавнего времени стеклопластики использовались преимущественно в самолётостроении, кораблестроении и космической технике. Широкое применение стеклопластиков сдерживалось, в основном, из-за отсутствия промышленной технологии, которая позволила бы наладить массовый выпуск профилей сложной конфигурации с требуемой точностью размеров. Эта задача успешно решена с созданием пултрузионной технологии. Существуют достаточно много методов, позволяющих массово производить

стеклопластиковые изделия различной конфигурации, необязательно профили — например, RTM, вакуумная формовка.

Стеклопластики являются одним из самых доступных и недорогих композиционных материалов. Основные затраты при производстве изделий из стеклопластика приходятся на технологическое оборудование и рабочую силу, затраты на которую велики за счет трудоёмкости и больших временных затрат на производство. Соответственно, на данный момент изделия из стеклопластика проигрывают по цене изделиям из металла из-за трудоёмкого и длительного процесса выклейки стеклопластиковых деталей, что вызывает большие затруднения при массовом производстве. Наиболее выгодно использование стеклопластика при мелкосерийном производстве. Крупносерийное производство становится более выгодным при использовании вакуумного формования. Также выгодным может быть и контактное формование, в случае если цена рабочей силы невелика.

Стеклопластик имеет удовлетворительную атмосферостойкость при условии наличия защитного покрытия, однако плохо переносит абразивный износ (например, от летящего с дороги песка), достаточно хрупок и с годами может деформироваться [12].



Рисунок 4 – стеклопластиковая арматура для усиления бетонных конструкций.

Углепластики (карбон) — полимерные композиционные материалы из переплетённых нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных (например, эпоксидных) смол. Плотность — от 1450 кг/м³ до 2000 кг/м³.

Материалы отличаются высокой прочностью, жёсткостью и малой массой, часто прочнее стали, но гораздо легче. По удельным характеристикам превосходит высокопрочную сталь, например, легированную конструкционную сталь 25ХГСА.

Вследствие дороговизны при экономии средств и отсутствии необходимости получения максимальных характеристик этот материал применяют в качестве усиливающих дополнений в основном материале конструкции.

Основная составляющая часть углепластика — это нити углерода. Такие нити очень тонкие (примерно 0,005-0,010 мм в диаметре), сломать их очень просто, а вот порвать достаточно трудно. Из этих нитей сплетаются ткани. Они могут иметь разный рисунок плетения (ёлочка, рогожа и др.).

Для придания ещё большей прочности ткани из нитей углерода кладут слоями, каждый раз меняя угол направления плетения. Слои скрепляются с помощью эпоксидных смол.

Нити углерода обычно получают термической обработкой химических или природных органических волокон, при которой в материале волокна остаются главным образом атомы углерода. Термическая обработка состоит из нескольких этапов:

1. Первый из них представляет собой окисление исходного (полиакрилонитрильного, вискозного) волокна на воздухе при температуре 250 °С в течение 24 часов. В результате окисления образуются лестничные структуры.

2. После окисления следует стадия карбонизации — нагрева волокна в среде азота или аргона при температурах от 800 до 1500 °С. В результате карбонизации происходит образование графитоподобных структур.

3. Процесс термической обработки заканчивается графитизацией при температуре 1600-3000 °С, которая также проходит в инертной среде. В результате графитизации количество углерода в волокне доводится до 99 %.

Помимо обычных органических волокон (чаще всего вискозных и полиакрилонитрильных), для получения нитей углерода могут быть использованы специальные волокна из фенольных смол, лигнина, каменноугольных и нефтяных пеков. Кроме того, детали из карбона превосходят по прочности детали из стекловолокна, но, при этом, обходятся значительно дороже.

Дороговизна карбона вызвана, прежде всего, более сложной технологией производства и большей стоимостью производных материалов. Например, для проклейки слоев используются более дорогие и качественные смолы, чем при работе со стеклонитью, а для производства деталей требуется более дорогое оборудование (к примеру, такое как автоклав).

При производстве углепластиков необходимо очень строго выдерживать технологические параметры, при нарушении которых прочностные свойства изделий резко снижаются. Необходимы сложные и дорогостоящие меры контроля качества изделий (в том числе, ультразвуковая дефектоскопия, рентгеновская, оптическая голография).

Другим серьёзным недостатком углепластиков является их низкая стойкость по отношению к ударным нагрузкам. Повреждения конструкций при ударах посторонними предметами (даже при падении инструмента на неё) в виде внутренних трещин и расслоений могут быть невидимы глазу, но приводят к снижению прочности; разрушение повреждённой ударами конструкции может произойти уже при относительной деформации, равной 0,5 % [13].

Углерод-углерод хорошо подходит для структурных применений при высоких температурах или когда требуется термостойкость. Хотя он менее хрупкий, чем многие другие керамики, ему не хватает ударопрочности.

Прочность углерод-углерод с однонаправленными армирующими волокнами составляет до 700 МПа. Углерод-углеродные материалы сохраняют свои свойства выше 2000 °С. Эта температура может быть превышена с помощью защитных покрытий для предотвращения окисления. Материал имеет плотность от 1,6 до 1,98 г / см³.

1.3.2. Применение композиционных материалов

Композиционные материалы применяются в аэрокосмической промышленности, транспорте, строительстве, производстве спортивных товаров. И в последнее время, строительство и транспорт являются самыми крупными областями применения. Вообще, высокоэффективные, но более дорогостоящие углепластиковые композиты используются там, где требуется высокая прочность, жесткость и легкий вес, а более дешевые стекловолоконные композиты используются в менее требовательных применениях, где вес не так критичен. В военной авиации низкий вес является важным фактором из соображений производительности и полезной нагрузки, а композиты часто приближаются к 20-40% веса самолёта. На протяжении десятилетий вертолетные лопасти изготавливали из стекловолокна для повышения усталостной прочности, а в последние годы вертолёты строят в основном из углепластиковых композитов. Военные самолеты, впервые применившие высокоэффективные композиты с непрерывным углеродным волокном, стимулировали развитие многих технологий, которые в настоящее время используются в других отраслях. Как малые, так и крупные коммерческие самолеты полагаются на композиты, чтобы уменьшить вес и увеличить экономию топлива. Наиболее ярким примером является 50-процентный композитный планер для нового Boeing 787. Все будущие самолеты Airbus и Boeing будут использовать большое количество высококачественных

композитов. Экономия веса за счет использования композитных материалов в аэрокосмической промышленности обычно колеблется от 15 до 25 процентов.

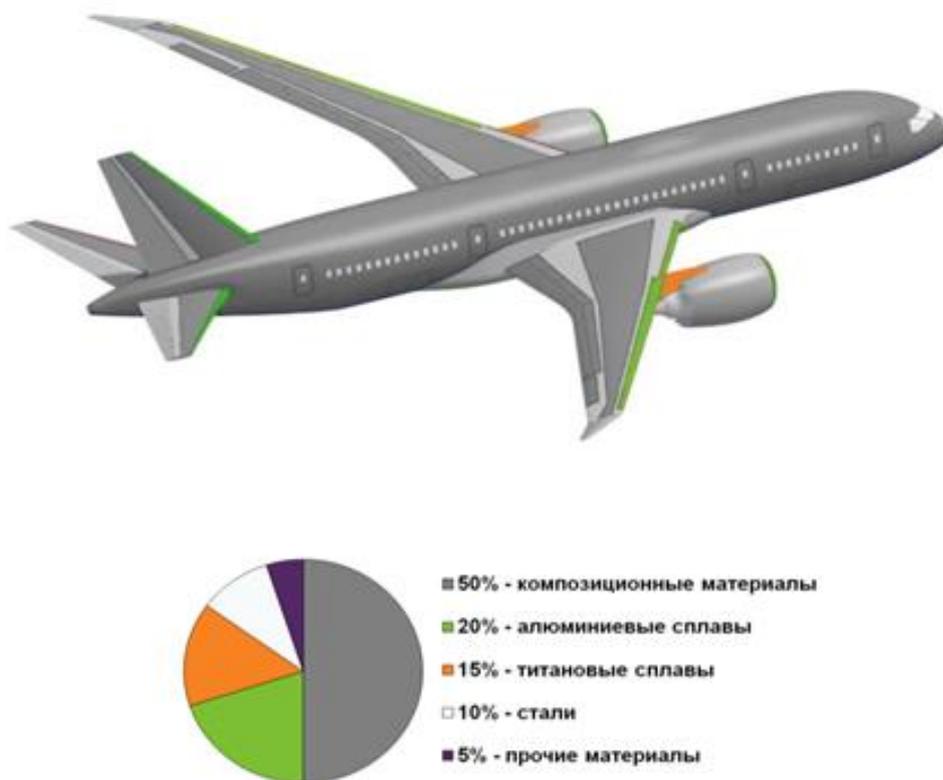


Рисунок 5 – использование композитов в авиастроении

Крупные автопроизводители все чаще обращаются к композитным материалам, чтобы соответствовать требованиям рабочих характеристик и весу, повышая тем самым эффективность использования топлива. Стоимость является основным фактором для коммерческого транспорта, а композиты обеспечивают меньший вес и более низкие затраты на обслуживание. Типичными материалами являются стекловолокно/полиуретан, изготовленные путем литья или компрессионного формования, и стекловолокна/полиэфира, изготовленные методом компрессионного формования. В рекреационных транспортных средствах давно используются стекловолокна, в основном из-за их долговечности и экономии веса по сравнению с металлом. Для высокопроизводительных гоночных автомобилей Формулы 1, где стоимость не

является препятствием, большая часть шасси, включая монокок, подвеску, крылья и крышку двигателя, изготовлена из углепластиковых композитов.

Коррозия является главной головной болью и основной статьей расходов для морской промышленности. Композиты помогают свести к минимуму эти проблемы, прежде всего потому, что они не подвержены коррозии, как металлы и не гниют подобно дереву. Корпуса катеров, от небольших рыболовных судов до больших гоночных яхт, обычно изготавливаются из стекловолокна и полиэфирных или виниловых сложноэфирных смол. Прицепы для водных мотоциклов и лодок часто содержат стеклянные композиты, которые помогают снизить вес и уменьшить коррозию. Совсем недавно верхние строения многих военно-морских судов были изготовлены из композитов.

Использование композитов для улучшения дорог и мостов - относительно новое применение композитов. Многие из дорог и мостов в мире сильно корродированы и нуждаются в постоянном техническом обслуживании или замене. Из-за их коррозионной стойкости композиты обладают гораздо более длительным сроком службы и меньшим обслуживанием. В строительстве используется пултрузионная арматура из стекловолокна для укрепления бетона. Энергия ветра - самый быстрорастущий источник энергии в мире. Лопастей для больших ветровых турбин обычно изготавливаются из композиционных материалов для повышения эффективности генерации электрической энергии. Эти лезвия могут достигать массы 5200 кг. Преобладающим материалом является непрерывное стекловолокно, изготавливаемое либо путем укладки, либо путем вливания смолы. Теннисные ракетки изготавливали из стекловолокна в течение многих лет, и многие клюшки для гольфа сделаны из углепластика. Более легкие, более прочные лыжи и доски для серфинга также стали возможны с использованием композитов. Хотя металлические и керамические матричные композиты обычно очень дорогие, они нашли применение в специализированных областях, таких как аэрокосмическая. Часто они используются там, где необходимо выдерживать высокие температуры.

Однако гораздо более высокая температура и давление, необходимые для изготовления металлических и керамических композитов, приводят к очень высоким затратам, что серьезно сужает круг их применение. Усовершенствованные композиты являются диверсифицированной и растущей отраслью благодаря их очевидным преимуществам по сравнению с конкурирующими материалами, в том числе металлом, по причине меньшего веса, более высокой эффективности и коррозионной стойкости. Они используются в аэрокосмической, автомобильной, морской и спортивной отраслях. Основным недостатком композитов является их высокая стоимость. Однако правильный выбор материалов (волокна и матрицы), форм изделий и процессов может существенно повлиять на стоимость готовой детали [14].



Рисунок 6 – применение композитов судостроении и автомобилестроении

1.4. Виды дефектов в композиционных материалах

Глобально, дефекты можно разделить на две категории: дефекты при производстве или заводской брак, и дефекты, полученные во время эксплуатации.

1.4.1. Заводской брак

К дефектам производства относятся:

- Отслоение
- Участки со смоляным голоданием
- Области, богатые смолами
- Волдыри, пузырьки воздуха

- Морщины
- Пустоты
- Термическое разложение

Производственный брак включает в себя дефекты, такие как пористость, краевые порезы, царапины, микротрещины и расслоения, возникающие в результате ошибок при обработке. Примеры дефектов, возникающих при изготовлении, включают в себя загрязненную поверхность склеивания или включения, такие как бумага для препрега или разделительная пленка, случайно оставленная между слоями во время укладки. Непредвиденное повреждение может возникать в деталях или компонентах во время сборки, транспортировки или во время работы.

Область богатая смолой, для неструктурных применений это не всегда плохо, но она добавляет вес детали. Участок со смоляным голоданием, образуется в результате того, что слишком много смолы сбрасывается во время процесса отверждения или если во время процесса мокрой укладки недостаточно смолы. Области, подверженные смоляному голоданию, обнаруживают себя по волокнам, которые видны на поверхности детали. Соотношение волокна и смолы 60:40 считается оптимальным. Источниками производственных дефектов являются:

- Неправильная обработка
- Неправильное отверждение
- Неправильная сверловка
- Несоответствующее оборудование
- Загрязнение
- Неправильное шлифование
- Некачественный материал

Повреждение внутри композитного материала могут быть разного масштаба. От повреждения матрицы и волокна до разрушенных элементов и прикрепленных либо закрепленных болтами приспособлений.

Повреждение волокна может иметь решающее значение, поскольку композиты обычно спроектированы так, чтобы бы волокна несли большую часть нагрузок. К счастью, разрушение волокна обычно ограничивается зоной вблизи точки удара и ограничено размером и энергией удара. Лишь некоторые дефекты могут привести к большим повреждениям волокон.

Матричные дефекты обычно возникают на границе раздела матрицы и волокна или в матрице, параллельной волокнам. Эти недостатки могут несколько снизить некоторые свойства материала, но редко критичны для структуры, если только не происходит широкого распространения разрушения матрицы. Накопление трещин матрицы может привести к деградации свойств матрицы. Матричные трещины или микротрещины могут значительно снизить свойства, зависящие от смолы или волоконно-полимерного стыка, такие как межслойный сдвиг и прочность на сжатие. Микрорастрескивание может оказать очень негативное влияние на свойства высокотемпературных смол. Матричные дефекты могут развиваться в расслоения, которые являются более критическим типом повреждения.

На поверхности раздела между слоями композита образуются расслоения. Отслаивание может образовываться из матричных трещин, которые растут в прослойке или от низкоэнергетического удара. При определенных условиях расслоения или разрывы могут расти при повторной нагрузке и могут привести к катастрофическому разрушению, когда слоистый материал испытывает нагрузку на сжатие. Критичность расслоения зависит от:

- Габаритных размеров
- Количества расслоений в данном месте.
- Местоположение - в глубине композита, вблизи к свободным краям, рядом с областью концентрации напряжений, геометрических разрывов и т. Д.

- Нагрузки - поведение расслоений зависят от типа нагрузки. Они мало влияют на композиты, которые нагружены на растяжение. Однако при сжатии или сдвиговой нагрузке сублиминаты, прилегающие к расслоениям или

разрыхленным элементам, могут изгибаться и вызывать механизм перераспределения нагрузки, что приводит к структурному разрушению.

В целом, последствия вызывают комбинации повреждений. Высокоэнергетические удары крупных объектов (например, лопастей турбины) могут привести к разрушению элементов и сбоям. Результатом повреждения может быть значительное разрушение волокна, растрескивание матрицы, расслаивание, сломанные крепежные детали. Повреждения, вызванные воздействием низкоэнергетического удара, более сдержанны, но могут также иметь комбинацию из повреждений волокон, матричных трещин и множественных расслоений.

1.4.2. Дефекты, полученные во время эксплуатации

Дефекты при эксплуатации включают в себя такие дефекты как:

- Ухудшение параметров в результате воздействия окружающей среды
- Попадание воды в сотовые панели
- Ударная нагрузка
- Усталость
- Трещины от локальной перегрузки
- Отслоение
- Разрушение волокна
- Эрозия

Многие сотовые конструкции, такие как спойлеры на крыльях, обтекатели, органы управления полётом и дверцы шасси, имеют тонкие лицевые панели, которые испытывают проблемы с долговечностью, которые можно разделить на три категории: низкая устойчивость к ударам, проникновение жидкости и эрозия. Эти элементы обладают достаточной жесткостью и прочностью, но с низкой устойчивостью к условиям эксплуатации, а обслуживающий персонал часто не осознает хрупкость тонкослойных сэндвич-частей. Повреждения этих компонентов, такие как

разрушение сотовой конструкции, ударные повреждения и расслоения, довольно часто легко обнаруживаются при визуальном осмотре из-за их тонких лицевых листов. Однако они иногда упускаются из виду или повреждаются обслуживающим персоналом, который не хочет задерживать вылет самолета или привлекать внимание к своим происшествиям, что может плохо отразиться на оценке их работы. Таким образом, ущерб иногда может не контролироваться, что часто приводит к еще более тяжелым последствиям.

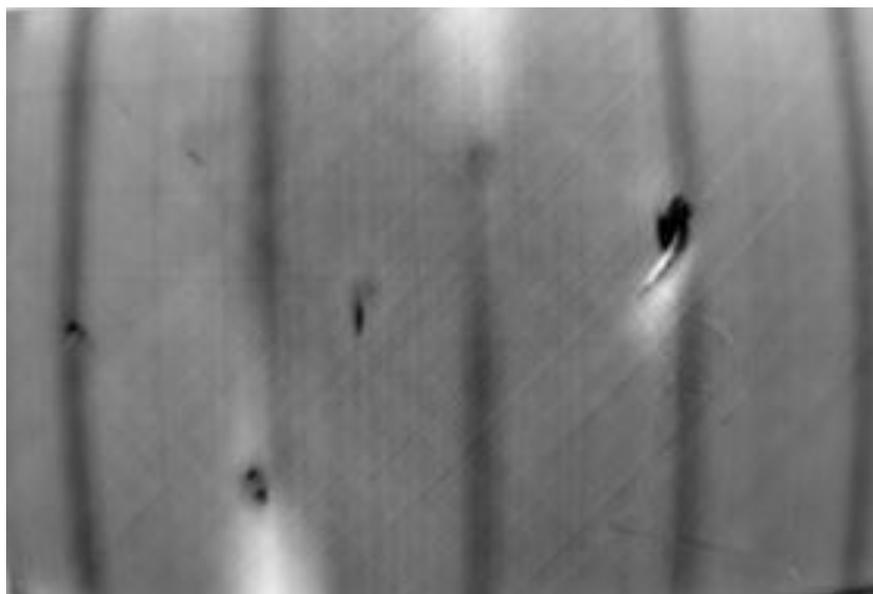


Рисунок 7 – фюзеляж самолета с дефектами

Известно, что уязвимость к эрозии композиционных материалов больше, чем у алюминия, и в результате этого их применение на передних поверхностях частей самолётов было прекращено. Однако композиты использовались в областях с очень сложной геометрией, но обычно с эрозионным покрытием. Другая проблема, не столь очевидная, как первая, заключается в том, что края дверей или панелей могут разрушаться, если они подвергаются воздействию воздушного потока. Эту эрозию можно объяснить неправильной конструкцией или установкой/сборкой. С другой стороны, металлические конструкции, находящиеся в контакте или вблизи этих композитных частей, могут подвергаться коррозии из-за неправильного выбора алюминиевого сплава,

поврежденного коррозионного герметика металлических деталей во время сборки.

1.5. Методы контроля композиционных материалов.

1.5.1. Визуально - измерительный метод

Визуальный метод контроля является основным методом проверки для контролирующих служб. Большинство видов повреждений - это обгорание, вмятина, износ или скол на композитной панели, видны невооруженным глазом. После обнаружения повреждений, пораженный участок необходимо осмотреть ближе, используя фонари, увеличительные стекла, зеркала и бороскопы. Эти инструменты используются для увеличения труднодоступных и малого размера дефектов. Визуальный осмотр не поможет найти внутренние дефекты в композите, такие как отслоения, разрушения волокон и растрескивания. Для обнаружения таких дефектов необходимы более совершенные методы неразрушающего контроля.

1.5.2. Ультразвуковые методы контроля

Ультразвуковая дефектоскопия оказалась очень полезным инструментом для обнаружения внутренних расслоений, пустот или несоответствий в деталях из композиционных материалов, которые не могут быть обнаружены с помощью визуального метода. Существует множество ультразвуковых методов, однако каждый метод использует энергию звуковой волны с частотой выше слышимого диапазона. В деталь вводится высокочастотная (обычно несколько МГц) звуковая волна, которая может быть направлена по нормали к поверхности либо вдоль поверхности, либо под некоторым заданным углом к поверхности детали. Затем звуковая волна отслеживается для обнаружения любых значительных изменений в её маршруте. Ультразвуковые волны обладают свойствами, подобными световой волне. Когда ультразвуковая волна ударяет по прерывистому объекту, волна или энергия поглощается или отражается обратно на поверхность. Поврежденная или уменьшенная звуковая энергия затем воспринимается приемным преобразователем и преобразуется в

дисплей на осциллографе или самописце. Дисплей позволяет оператору оценивать несоответствующие показания относительно тех областей, которые, как известно, являются бездефектными. Для облегчения сравнения используются эталонные стандарты для калибровки ультразвукового оборудования. Специалист по ремонту должен понимать, что изложенные здесь концепции отлично работают в повторяющихся производственных условиях, но их сложнее реализовать в ремонтной среде, учитывая огромное количество различных составных компонентов, установленных на борту самолета, и относительную сложность их конструкции, в эталонных стандартах также должны учитываться изменения материала, которые происходят, когда композит подвергается воздействию окружающей среды в процессе эксплуатации в течение длительного периода времени или был объектом ремонтной деятельности или аналогичного восстановительного действия.

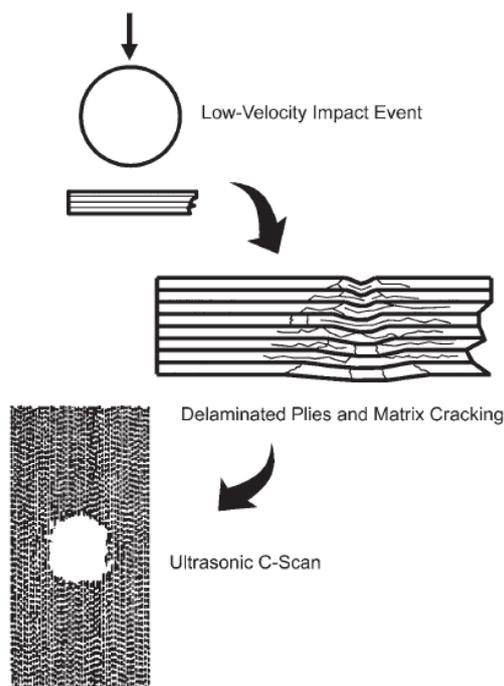


Рисунок 8 – круговое ультразвуковое сканирование

1.5.3. Теневой эхо-метод

В теневом эхо-методе ультразвукового контроля используются два датчика, по одному с каждой стороны проверяемого участка. Ультразвуковой сигнал передается от одного преобразователя на другой преобразователь. Затем

измеряют потерю мощности сигнала по прибору. Инструмент показывает потерю в процентах от первоначальной силы сигнала или потери в децибелах. Сигнал потери сравнивают с эталоном. Области с большей потерей, чем в эталоне, указывают на дефект.

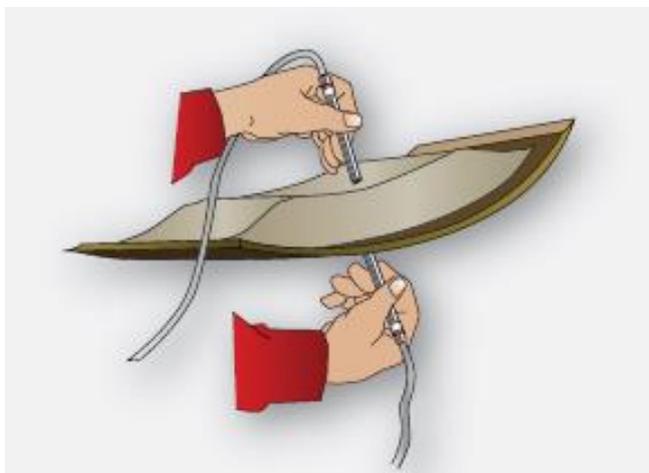


Рисунок 9 – Теневой эхо-метод

1.5.4. Эхо-метод

В этом способе один датчик работает как передающий и принимающий преобразователь, который возбуждается электрическими импульсами. Каждый электрический импульс активирует элемент преобразователя. Этот элемент преобразует электрическую энергию в механическую энергию в виде ультразвуковой звуковой волны. Звуковая энергия проходит через тефлон или метакрилат в объект контроля. Любое изменение амплитуды принятого сигнала или время, необходимое для возврата эхо-сигнала на преобразователь, указывает на наличие дефекта. Импульсный эхо-метод используется для обнаружения отслоений, трещин, пористости, воды и отложений связанных компонентов. Импульсный эхо-метод не позволяет обнаружить дефекты между многослойной обшивкой и сотовым наполнителем.

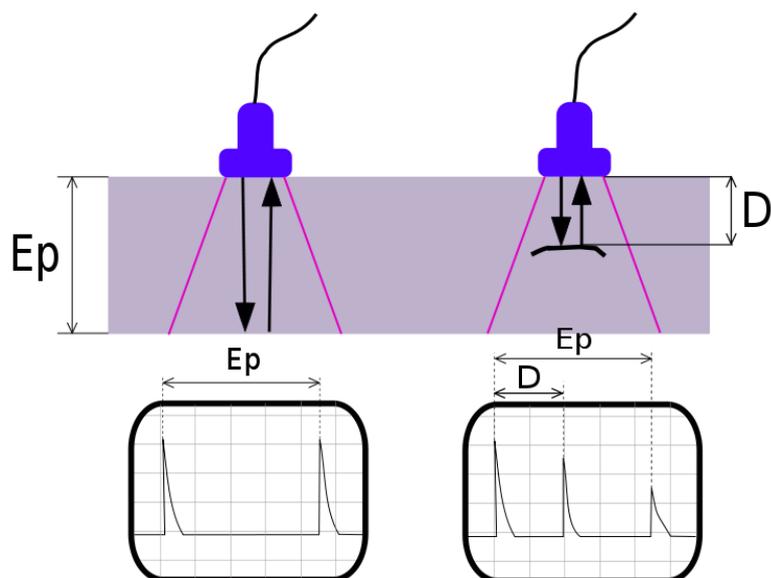


Рисунок 10 – Эхо-метод (E_p – толщина объекта контроля, D – глубина залегания дефекта)

1.5.5. Радиационный метод

Радиография, является очень полезным методом неразрушающего контроля, поскольку она позволяет видеть внутренность детали. Этот метод контроля осуществляется путем пропускания рентгеновских лучей через объект контроля и дальнейшей регистрации рентгеновских лучей на пленку, чувствительную к рентгеновскому излучению. Проявленная пленка, позволяет дефектоскописту анализировать плотность почернения, фактически создавая визуализацию взаимосвязи внутренних деталей компонента. Так как метод регистрирует изменения общей плотности по его толщине, это не является предпочтительным методом для обнаружения дефектов, таких как расслоения, которые находятся в плоскости, которая расположена по нормали к лучу. Однако это наиболее эффективный метод для обнаружения дефектов, параллельных центральной линии рентгеновского луча. Внутренние аномалии, такие как расслоения в углах, вода в сотах, пустоты в пенных адгезивных соединениях и относительное положение внутренних деталей, могут быть легко видны с помощью радиографии. Большинство композитов почти прозрачны для рентгеновских лучей, поэтому должно использоваться рентгеновское

излучение с низкой энергией. Из-за проблем с безопасностью обследовать самолеты нецелесообразно. Операторы всегда должны быть защищены свинцовыми экранами, так как есть риск облучения либо из рентгеновской трубки, либо из рассеянного излучения. Важное значение имеет поддержание минимального безопасного расстояния от источника рентгеновского излучения.

1.5.6. Тепловой метод

Тепловой метод контроля включает все методы, в которых используются устройства для измерения температуры и для измерения изменений температуры проверяемых деталей. Основным принципом теплового контроля состоит в измерении или картировании температур поверхности. Все термографические методы основаны на различиях в теплопроводности между нормальными и дефектными областями. Обычно источник тепла используется для повышения температуры исследуемой детали при наблюдении эффектов нагрева поверхности. Поскольку зоны, свободные от дефектов, проводят тепло более эффективно, чем области с дефектами, количество тепла, которое либо поглощается, либо отражается, указывает на качество детали. Тип дефектов, которые влияют на термические свойства, включают в себя трещины, ударные повреждения, и попадание воды в сотовую панель композита. Термические методы наиболее эффективны для тонких композитов или дефектов вблизи поверхности [15].



Рисунок 11 – устройство для контроля самолетов (Automation Technology, Германия)

2. Объект и методы исследования

Классический ТК, применяющий, как правило, оптический нагрев, позволяет обнаруживать дефекты относительно большой площади ($> 10 \text{ мм}^2$), создающие значительное тепловое сопротивление потоку нагрева. Предельная глубина обнаружения обычно составляет 3-5 мм в односторонней процедуре и 5-15 мм в двухсторонней процедуре (для дефектов малой площади) [2].

Недостатками оптического нагрева являются:

1) низкая эффективность нагрева светлоокрашенных материалов, отражающих излучение нагрева;

2) наличие мощного отраженного излучения после выключения источника, что существенно ухудшает эффективность ТК в односторонней процедуре. Некоторые недостатки ТК могут быть преодолены, комбинируя тепловизионный способ регистрации с вихретоковым или ультразвуковым (УЗ) нагревом. В частности, УЗ стимуляция позволяет обнаруживать скрытые трещины в металлах и неметаллах, не выявляемые при поверхностном нагреве.

В работе показано, что между энергией повреждений, то есть между степенью "серьёзности" дефектов, и теплофизическими характеристиками материала существует устойчивая корреляционная связь.

2.1. Описание объекта исследования

Для проведения экспериментальных исследований были использованы углепластиковые и стеклопластиковые пластины (рис 1.) с различной энергией повреждения. Всего было использовано 7 стеклопластиковых и 7 углепластиковых пластин толщиной 6мм. Образцы из стеклопластика содержали ударное повреждение с энергией от 5 до 35 джоулей, углепластиковые образцы с энергией содержали ударное повреждение с энергией от 5 до 45 джоулей. Дефект, с известной энергией удара, находился примерно по центру пластины.

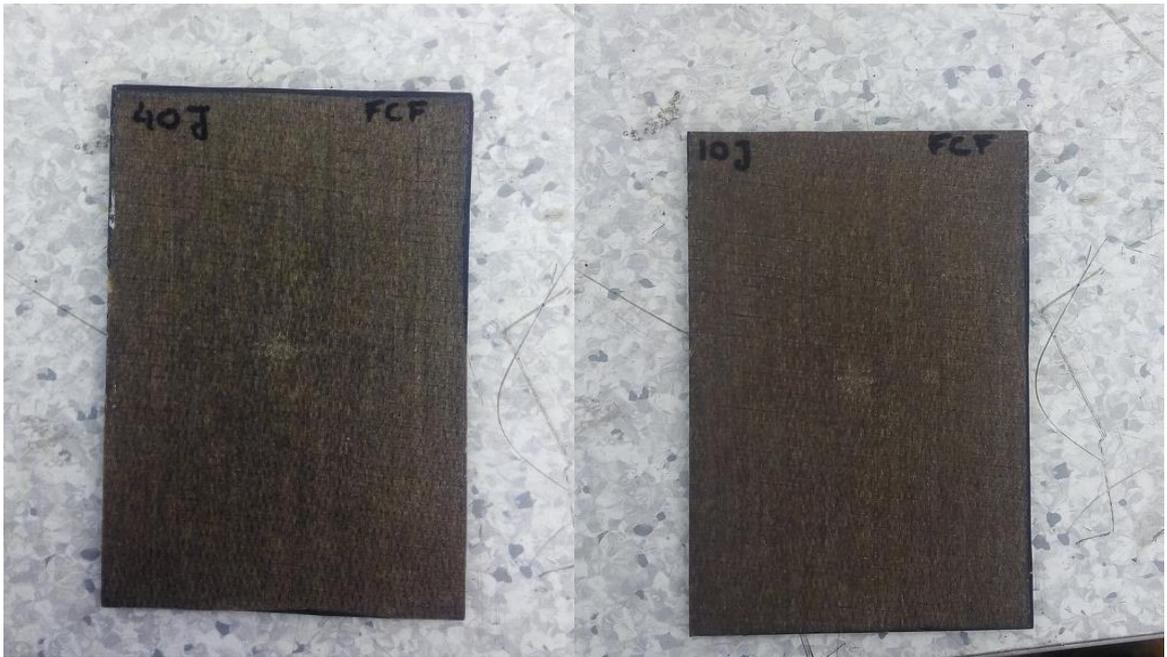


Рисунок 12 – Пластины из углепластика.

2.2. Описание тепловизионных систем

Для процедуры активного теплового контроля использованы два тепловизора ThermaCAM P65 HS фирмы FLIR Systems (США) и NEC TH-9100 фирмы NEC Avio (Япония). Оба прибора обладают весьма близкими характеристиками и производят приблизительно одинаковые результаты ТК коррозии.



Рисунок 13 – Тепловизоры: а) NEC TH-9100; б) FLIR Systems ThermaCAM P65 HS

Для обеспечения показателей тепловизионного контроля, соответствующих лучшим мировым приборам, был также применен тепловизор SC7700M (Рисунок 14) производства фирмы FLIR Systems (США).

Основные параметры тепловизора:

- Инфракрасный охлаждаемый МСТ детектор (КРТ) со спектральной чувствительностью в диапазоне 8-10 мкм, матрица 640x512 элементов, скорость 115 Гц (полный кадр), до 2900 Гц (в уменьшенном окне), чувствительность 0,02°C.
- Температурная калибровка HyperCAL (5°C - 500°C).

Параметрами тепловизора, делающими его одной из лучших в мире моделей для проведения научных исследований, являются:

- 1) формат изображения 640x512;
- 2) температурная чувствительность 20 мК;
- 3) частота смены изображений 115 Гц при полном формате.



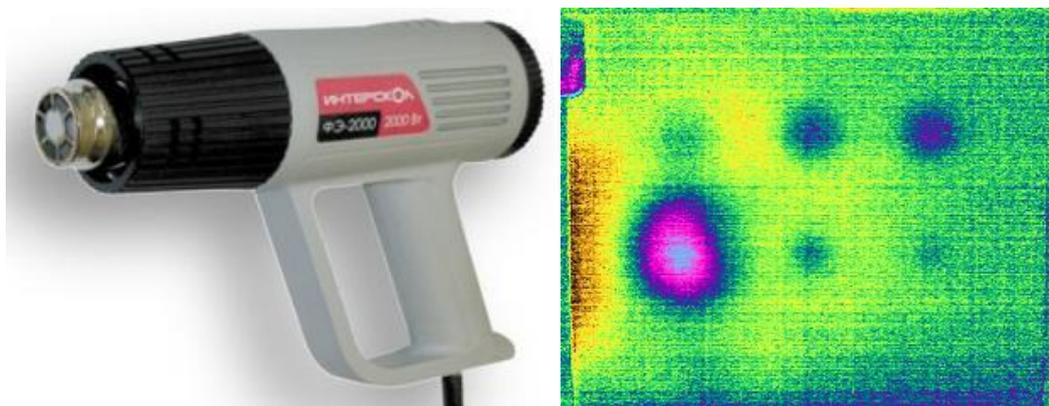
Рисунок 14 – Тепловизор FLIR SC 7700M

Но ввиду нецелесообразности использования такого дорогого и высокоточного тепловизора, так как с необходимой нам точностью, измерения можно проводить на тепловизоре NEC TH-9100 без потери качества, большинство измерений проводилось с помощью тепловизора фирмы NEC.

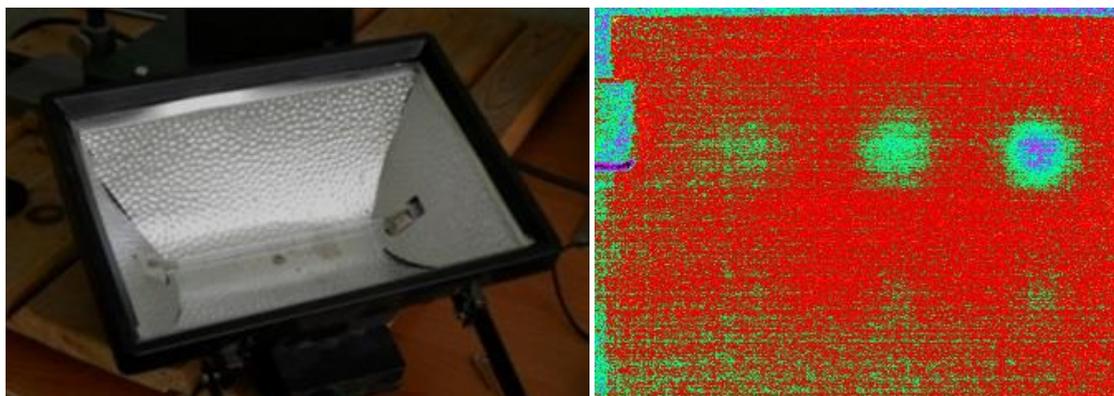
2.3. Описание источников нагрева

Для контроля стандартных образцов толщиной 6 мм применялись следующие источники нагрева: промышленный фен мощностью 2 кВт, две галогеновые лампы мощностью 1 кВт каждая, резистивный полосовой нагреватель мощностью 2 кВт, площадочный контактный нагреватель мощностью 1,5 кВт и две ксеноновые импульсные лампы с энергией 3,2 кДж и длительностью импульса 5 мс.

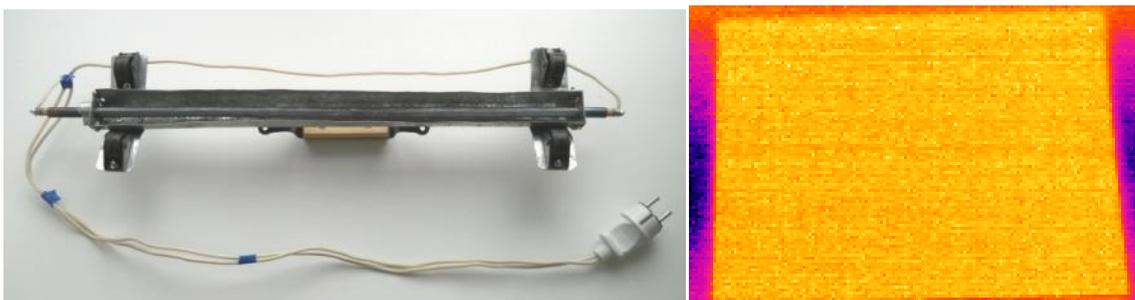
Сравнение техник нагрева продемонстрировано на Рисунке 15, где приведены оптимальные инфракрасные изображения контрольного образца, полученные с помощью различных нагревателей. Отрицательные результаты были получены с использованием полосового нагревателя, по-видимому, из-за неоптимальной скорости сканирования поверхности. Проблема с использованием контактного площадочного нагревателя состояла в появлении воздушных зазоров между плоскостью нагревателя и поверхностью объекта контроля, что создавало неравномерный нагрев. Конвективный и оптический нагрев привели к сходным результатам. Данные по количеству обнаруживаемых дефектов приведены в Таблице 1.



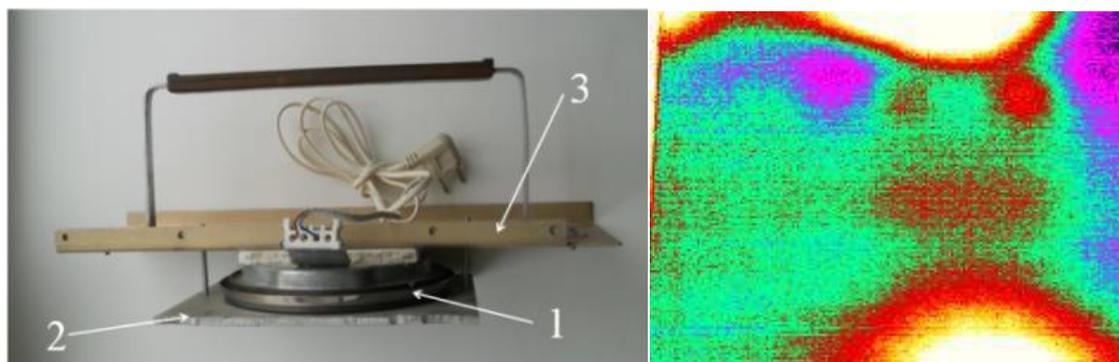
а - конвективный нагрев промышленным феном мощностью 2 кВт



б - оптический нагрев галогенной лампой мощностью 1кВт



в - нагрев полосовым резистивным нагревателем мощностью 2 кВт, вручную перемещаемым вдоль поверхности объекта контроля



г - контактный нагрев площадочным резистивным нагревателем мощностью 1,5 кВт



д - оптический нагрев двумя ксеноновыми импульсными лампами с энергией 3,2 кДж и длительностью импульса 5 мс

Рисунок 15 – Сравнение техник нагрева при испытаниях стандартного образца толщиной 6 мм

Таблица 1 – Сравнительные результаты активного ТК контрольного образца толщиной 6 мм

Источник нагрева	Число обнаруженных дефектов (из 9)
Промышленный фен	5
Галогенная лампа 500 Вт	4
Полосовой нагреватель	0
Площадочный нагреватель	2
Две ксеноновые лампы 3,2 кДж	3

В итоге, окончательный выбор нагревателя был сделан в пользу оптических галогенных ламп, в виду того что с помощью промышленного фена не всегда удавалось равномерного нагрева образца, что негативно сказывалось на результатах эксперимента.

2.4. Обработка экспериментальных данных

Обработку экспериментальных данных проводили с помощью программы ThermoFit Pro, ранее разработанной В.В. Ширяевым в Томском политехническом университете и специализированной программой ThermoLab для синхронной работы с управляющей программой.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Обнаружение дефектов в композитных материалах, применяемых в авиакосмической, ракетной промышленности, является одной из важных задач теплового неразрушающего контроля. Обнаружить дефекты в таких объектах можно различными методами, такими как ультразвуковой, магнитопорошковый или капиллярный.

Целью работы является разработка метода активного теплового контроля композиционных материалов в авиационной промышленности.

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования по тепловому контролю, в процессе которых было использовано современное оборудование. Полученные термограммы были обработаны с помощью специального программного обеспечения, позволяющего быстро и точно получать достоверные результаты контроля.

Реализация данных методов инфракрасной термографии позволит улучшить процесс контроля объектов из композитных материалов.

Целевой аудиторией данного проекта являются:

- Экспертные организации, лаборатории неразрушающего контроля;
- Авиастроительные заводы, судостроительные производства;
- Строительные компании;
- Лаборатории тепловых методов в учебных заведениях.

4.1. SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

1. Сильные стороны. Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно–исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?
- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?
- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

2. Слабые стороны. Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?
- Что делается плохо?
- Чего следует избегать?

3. Возможности. Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную

позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке?
- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?
- Какие интересные тенденции отмечены?
- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

4. Угроза. Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?
- Что делают конкуренты?
- Какие препятствия стоят перед вашим проектом (например, снижение бюджетного финансирования проекта, задержка финансирования проекта и т.п.)?
- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?
- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?
- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в табличной форме (табл. 6).

Таблица 6 – Матрица SWOT-анализа.

<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Возможность контроля объектов из композиционных материалов; С2. Применение современного программного обеспечения; С3. Метод экономичный и энергоэффективный С4. Экологичность технологии. С5. Наглядность представления результатов исследования С6. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Жестко фиксируемые параметры объекта контроля Сл2. Ограничения программного обеспечения для моделирования эксперимента Сл3. Возможное несоответствие параметров опытного образца параметрам реальных объектов контроля Сл4. Дороговизна оборудования для проведения контроля Сл5. Длительное время проведения контроля. Сл6. Отсутствие бюджетного финансирования</p>
<p>Возможности: В1. Широкое применение изделий из композиционных материалов (углепластик) повсеместно. В2. Повышение стоимости конкурентных разработок В3. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В4. Появление дополнительного спроса на новый продукт В5. Ужесточение требований промышленной безопасности.</p>	<p>Угрозы: У1. Повышение стоимости композиционных материалов У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства У3. Развитая конкуренция технологий неразрушающего контроля У4. Инертность российского рынка У5. Медленное внедрение технологических новшеств</p>

По результатам SWOT-анализа можно сделать следующие выводы:

1. Экологичность технологии контроля и наглядность представления результатов исследования окажут положительное влияние на внедрение разработки в условиях активного использования в промышленности композиционных материалов и появления дополнительного спроса на новый продукт.

2. Несмотря на развитую конкуренцию технологий неразрушающего контроля, у предлагаемого научного проекта имеется ряд неоспоримых преимуществ: применение современного программного обеспечения, наличие бюджетного финансирования, квалифицированный персонал. Данные преимущества обеспечат проекту жизнеспособность на конкурентном рынке.

3. В условиях активного использования в промышленности композиционных материалов и появления дополнительного спроса на новый продукт необходимо создание методики пересчета параметров объекта контроля и дополнительная проверка методики на реальных объектах контроля.

4. Развитая конкуренция технологий неразрушающего контроля может привести к отсутствию спроса на разработку из-за наличия слабых сторон проекта, которые окажут влияние на его конкурентоспособность: жестко фиксируемые параметры объекта контроля, возможное несоответствие параметров опытного образца параметрам реальных объектов контроля, ориентация на проведение неразрушающего контроля в лабораторных условиях.

Матрица «Сильные стороны-возможности» (таблица 2) показывает, какие сильные стороны необходимо использовать, чтобы получить отдачу от возможностей во внешней среде.

Таблица 7 – Матрица «Сильные стороны-возможности»

	Сильные стороны						
		C1.	C2.	C3.	C4.	C5.	C6.
Возможности	B1.	-	+	+	-	+	-
	B2.	-	-	+	+	-	-
	B3.	-	+	-	-	+	+
	B4.	-	+	+	+	+	-
	B5.	-	-	-	+	-	-

Анализ таблицы 2 представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей: В1С2С3С5, В2С3С4, В3С3С5С6, В4С3С3С4С5, В5С4.

Матрица «Слабые стороны-возможности» (таблица 3) показывает, за счет каких возможностей внешней среды организация сможет преодолеть имеющиеся слабости.

Таблица 8 – Матрица «Слабые стороны-возможности»

	Слабые стороны						
		Сл1.	Сл2.	Сл3.	Сл4.	Сл5.	Слб.
Возможности	В1.	-	-	-	-	-	0
	В2.	-	-	-	+	-	-
	В3.	-	-	-	-	0	-
	В4.	-	-	-	+	-	+
	В5.	+	-	-	-	-	-

Анализ таблицы 3 представляется в форме записи сильно коррелирующих слабых сторон и возможностей: В2Сл4В4Сл4СлбВ5Сл1.

Матрица «Сильные стороны-угрозы» (таблица 4) показывает, какие силы необходимо использовать организации для устранения угроз.

Таблица 9 – Матрица «Сильные стороны-угрозы»

	Сильные стороны						
		С1.	С2.	С3.	С4.	С5.	С6.
Угрозы	У1.	-	-	-	-	-	-
	У2.	-	-	+	-	-	-
	У3.	-	+	+	-	+	+
	У4.	-	-	-	-	-	-
	У5.	-	-	-	-	-	-

Анализ таблицы 4 представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и угроз: У2С3, У3С2С3С5С6.

Матрица «Слабые стороны-угрозы» показывает (таблица 5), от каких слабостей необходимо избавиться, чтобы попытаться предотвратить нависшую угрозу.

Таблица 10 – Матрица «Слабые стороны-угрозы»

	Слабые стороны						
		Сл1.	Сл2.	Сл3.	Сл4.	Сл5.	Сл6.
Угрозы	У1.	-	-	-	-	-	-
	У2.	-	-	0	-	0	-
	У3.	-	-	-	-	-	-
	У4.	-	-	0	+	+	-
	У5.	-	-	-	-	-	-

Анализ таблицы 5 представляется в форме записи сильно коррелирующих слабых сторон и угроз: У4Сл4Сл5.

По окончании третьего этапа была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приведена в таблице 6.

За счет увеличения финансирования, станет возможным внедрение импульсного метода теплового контроля качества изделий из композиционных материалов на промышленных предприятиях, что в значительной мере позволит снизить количество аварийных ситуаций.

Таблица 11 -SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Возможность контроля объектов из композиционных материалов;</p> <p>С2. Применение современного программного обеспечения;</p> <p>С3. Метод экономичный и энергоэффективный</p> <p>С4. Экологичность технологии.</p> <p>С5. Наглядность представления результатов исследования</p> <p>С6. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Жестко фиксируемые параметры объекта контроля</p> <p>Сл2. Ограничения программного обеспечения для моделирования эксперимента</p> <p>Сл3. Возможное несоответствие параметров опытного образца параметрам реальных объектов контроля</p> <p>Сл4. Дороговизна оборудования для проведения контроля</p> <p>Длительное время проведения контроля.</p> <p>Отсутствие бюджетного финансирования</p>
<p>Возможности:</p> <p>В2. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В4. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В5. Ужесточение требований промышленной безопасности.</p>	<p>В2С1С2С3С4</p> <p>Использование нового метода контроля при одностороннем доступе</p>	<p>В2Сл4В4Сл4Сл6В5Сл1</p> <p>Необходимо увеличить финансирование научно-исследовательских работ.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p>	<p>У2С3, У3С2С3С5С6</p> <p>Продвижение метода с акцентированием на достоинствах</p>	<p>У4Сл4Сл5</p> <p>Развитие собственной технической базы</p>

У3. Развитая конкуренция технологий неразрушающего контроля		
У4. Инертность российского рынка		

Список публикаций

1. Еганов В.А. Оценка энергии ударных повреждений в композиционных материалах авиационной промышленности методом активного теплового контроля / Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2015», г. Москва, 1-5 декабря 2015 г.: в 5 частях. – М.: Изд-во МИРЭА, 2015 – часть 2 – [С. 11-12].

2. Еганов В. А. Разработка метода активного теплового контроля ударных повреждений в авиационных композитах / В. А. Еганов; науч. рук. В. П. Вавилов // Неразрушающий контроль: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции "Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность", Томск, 23-27 мая 2016 г.: в 3 т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 1. — [5 с.].