

ЧУЛКОВ АРСЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АППАРАТУРЫ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО
КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И
ИЗДЕЛИЙ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор **Владимир Платонович Вавилов**

Официальные оппоненты: **Захаренко Владимир Андреевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Технология электронной аппаратуры»

Лобода Егор Леонидович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий кафедрой «Физическая и вычислительная механика»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина»

Защита диссертации состоится «12» января 2016 года в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «25» ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований обусловлена необходимостью обеспечения (повышения) качества продукции путем внедрения имеющихся и разработки новых методов и средств неразрушающего контроля (НК), в особенности, в высокотехнологичных отраслях промышленности (авиакосмической и военной технике, ядерной энергетике, автомобиле- и судостроении и др.). При производстве и испытаниях композиционных материалов тепловой контроль (ТК) обеспечивает обнаружение практически важных дефектов в сочетании с высокой производительностью испытаний и наглядной формой представления результатов, а при контроле металлических материалов новые методы тепловой стимуляции способны обеспечить конкуренцию ТК с более традиционными способами испытаний.

Степень разработанности темы

Разработка методик и аппаратуры ТК, ориентированных на диагностику состояния и исследование теплофизических характеристик различных материалов, осуществляется в ведущих научных лабораториях России, США, Канады, Германии, Франции, Финляндии, а в последние годы Индии и Китая. Среди зарубежных ученых, чьи исследования внесли существенный вклад в развитие активного ТК, необходимо отметить X. Maldague (Канада), D. Balageas (Франция), E. Cramer, D. Burleigh и S. Shepard (США). E. Grinzato, S. Marinetti и P. Bison (Италия), D. Almond (Великобритания), G. Busse (Германия), N. Avdelidis (Греция), W. Swiderski (Польша) и др. В СССР первые исследования по ТК были выполнены еще в 70-е годы прошлого века Н.А. Бекешко, В.П. Вавиловым, Ю.А. Поповым, Д.А. Рапопортом, О.Н. Будадиным, Б.Н. Епифанцевым, а в последние десятилетия Е.В. Абрамовой, А.Н. Чепрасовым, В.А. Захаренко, В.Г. Торгунаковым и др. Лаборатория теплового контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) является одной из ведущих в России, проводя теоретические и прикладные исследования в области пассивного и активного ТК на протяжении 30 лет. К настоящему времени в лаборатории разработаны методики ТК, утвержденные на федеральном уровне, созданы пакеты компьютерных программ, поставляемые за рубеж, разработаны прототипы приборов, часть из которых выпускалась малыми

сериями. На протяжении последнего десятилетия лаборатория осуществляет интенсивное международное сотрудничество с передовыми зарубежными организациями и ведущими учеными.

Цель исследования – дальнейшее развитие способов, технологии и аппаратуры активного ТК металлических и композиционных материалов и изделий, используемых в авиакосмической промышленности, энергетике и других высокотехнологичных областях.

Задачи исследования

- Разработать методику активного ТК скрытой коррозии в металлических изделиях толщиной до 6 мм с количественным определением степени уноса материала в зонах с поперечным размером более 10 мм.
- Разработать методику определения «поперечных» компонент анизотропных теплофизических характеристик (ТФХ) композиционных материалов на основе анализа изменения логарифмической «Фурье-температуры» объектов контроля во времени с использованием пространственной щелевой маски, задающей несущую пространственную частоту.
- Разработать методику проведения ТК металлических и композиционных материалов и изделий с применением источников нагрева и инфракрасных (ИК) тепловизоров различных типов, а также с использованием моделирующих программ и современных алгоритмов обработки последовательностей ИК изображений.
- Выполнить статистический анализ эффективности различных алгоритмов обработки нестационарных ИК термограмм (с применением Фурье - и вейвлет-преобразований, анализа главных компонент, корреляционного анализа и др.).
- Разработать прототип экспериментального теплового дефектоскопа с универсальным спектром применения для реализации вышеупомянутых способов ТК.
- Исследовать возможность применения метода терагерцовой ИК термографии для контроля воды в композиционных сотовых конструкциях.

Объектом исследования является активный метод теплового НК металлических и композиционных материалов и изделий с применением оптических, конвекционных и электромагнитных источников тепловой стимуляции контролируемых объектов.

Предметом исследования являются температурные отклики поверхности дефектных и бездефектных областей контролируемых объектов на стимуляцию нагревателями различного типа, а также динамика изменения температуры в анизотропных композиционных материалах.

Научная новизна

- Разработана методика определения степени коррозии металлических конструкций толщиной до 6 мм (по стали), основанная на определении безразмерного температурного контраста в дефектных зонах и обеспечивающая погрешность не более 10 %, если поперечные размеры зоны коррозии более чем в 3 раза превосходят толщину конструкций. Дефектометрия меньших дефектов требует введения поправочного коэффициента, зависящего от параметров объекта контроля и поперечных размеров дефектов.
- Установлено, что оптимальным алгоритмом обработки ИК термограмм при активном ТК по критерию отношения сигнал/шум является определение корреляции между температурными сигналами в бездефектной и дефектной областях, а близкие результаты обеспечиваются применением Фурье- и вейвлет-преобразования, а также метода анализа главных компонент.
- Разработана методика тепловизионного определения анизотропных теплофизических характеристик композиционных материалов на основе анализа изменения логарифмической «Фурье-температуры» во времени. Методика предусматривает создание несущей пространственной частоты путем размещения между источником нагрева и объектом контроля пространственной щелевой маски.
- Установлено, что стимуляция электромагнитным излучением в терагерцовом диапазоне в комбинации с ИК термографией позволяет эффективно обнаруживать воду в сотовых композиционных (не углеродсодержащих) конструкциях.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

- Разработан прототип теплового дефектоскопа широкого применения, предназначенный для обнаружения коррозии металлических оболочек, а также для выявления дефектов композиционных материалов, в особенности, ударных повреждений в углепластиковых композитах.

- Разработана методика активного ТК, применимая как к металлам, так и композитам, основанная на использовании современных методов обработки ИК изображений, а именно, корреляционного анализа, Фурье- и вейвлет-преобразования, а также метода анализа главных компонент.

Основные положения, выносимые на защиту

- Количественную оценку степени коррозии металлических оболочек, выраженной относительным утонением $\Delta L/L$, следует проводить с использованием безразмерного температурного контраста C при условии, что поперечные размеры зоны коррозии более чем в 3 раза превосходят толщину конструкций; при этом погрешность оценки коррозии не превышает 10%; дефектометрия меньших дефектов требует введения поправочного коэффициента, зависящего от параметров объекта контроля и «кажущихся» поперечных размеров дефектов.
- Ортотропные композиты характеризуются тремя компонентами анизотропной теплопроводности. «Сквозную» теплопроводность определяют по методу Паркера. «Поперечные» компоненты теплопроводности следует определять путем анализа логарифмических «Фурье-температур» с использованием пространственных масок, причем в практических измерениях следует применять щелевую маску, что позволяет проводить измерения на определенной несущей пространственной частоте.
- Основными алгоритмами обработки динамических последовательностей ИК термограмм, обеспечивающими повышение отношения сигнал/шум, являются: Фурье- и вейвлет-анализ, анализ главных компонент и оценка корреляции между температурными сигналами в бездефектной и дефектной областях. Эффективность применения данных алгоритмов зависит от характера изменения температуры во времени и природы преобладающих шумов.
- Феномен прозрачности композиционных (не углеродсодержащих) материалов и непрозрачности воды для терагерцового излучения, в сочетании с ИК термографическим принципом его визуализации, позволяет эффективно обнаруживать воду в сотовых конструкциях.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационных исследований использованы при разработке методики ТК коррозии в контейнерах, предназначенных для хранения радиоактивных отходов (совместный проект с Папским католическим университетом г. Рио-де-Жанейро), методики ТК цилиндрических изделий из углепластика в ядерной энергетике, методики ТК изделий авиационной промышленности, а также в учебном процессе в Томском политехническом университете.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов

обеспечивается использованием компьютерной тепловизионной аппаратуры, которая позволяет измерять абсолютные температуры с основной погрешностью не более $\pm 1\%$ или $\pm 1^\circ\text{C}$ и дифференциальные температуры с чувствительностью до $0,02^\circ\text{C}$. Теоретические исследования выполнены с помощью численных методов решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности и подтверждены результатами экспериментальных исследований на стандартных образцах. Для обработки экспериментальных данных использованы апробированные методы компьютерного анализа изображений и статистической обработки результатов измерений. Полученные теоретические и экспериментальные результаты не противоречат общефизическим принципам и данным, полученным другими авторами.

Апробация работы

Результаты диссертационных исследований докладывались на конференции Asia QIRT'2015, Индия, двух конференциях Международного оптического общества SPIE "Thermosense", США, 2013 и 2015 гг., на Международной конференции по прикладной и теоретической механике MECHANICS, Италия, 2014 г., на Международной 11-й конференции неразрушающего контроля «11th European Conference on Non-Destructive Testing», Чехия, 2014 г., и на II Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», Томск, 2014 г.

Личный вклад автора заключается в:

- разработке и экспериментальном апробировании методики тепловизионной оценки коррозионного уноса задней стенки металлических изделий с использованием «трехмерного» алгоритма;

- разработке и экспериментальном апробировании методики тепловизионной оценки анизотропных ТФХ ортотропных композиционных материалов;
- разработке прототипа теплового дефектоскопа широкого спектра действия;
- проведении большого объема экспериментальных исследований по контролю металлических и композиционных материалов и изделий;
- исследовании возможностей нового метода неразрушающего контроля – терагерцовой ИК термографии – при выявлении воды в сотовых композиционных конструкциях.

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и грантами

Результаты диссертационных исследований связаны с выполнением договора №5-191/13У от 01.10.2013г. «Разработка метода определения теплофизических характеристик углепластика с помощью теплового неразрушающего контроля», гранта ФЦП № 11.519.11.6015 от 06. 09. 2011 г. «Разработка экспрессного тепловизионного контроля скрытой коррозии в стальных резервуарах, используемых в ядерной и теплоэнергетической промышленности, в особенности, контейнеров для хранения радиоактивных отходов», гранта ВИУ_ИНК_66_2014 от 2014г. «Технологии и комплексы томографического неразрушающего контроля нового поколения», контракта №5-285/14 от 18.11.2014г. «Неразрушающий контроль авиационных и космических материалов методом активной количественной инфракрасной термографии (AQIRT)», а также индивидуального гранта диссертанта «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» № 5076 ГУ1/2014 от 26.12.2014г. «Разработка мощного светодиодного источника нагрева для портативного теплового дефектоскопического аппарата».

Публикации

Соискателем опубликовано 29 работ, из них по теме диссертации - 18 работ, в том числе 10 статей в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (одна из которых с импакт-фактором более 2), и 2 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК. Получен 1 патент на изобретение и 2 патента на полезные модели.

Структура и объем диссертационных исследований

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 117 работ, и трех актов использования результатов диссертационных исследований, содержит 143 страницу текста, 73 рисунка, 33 формулы и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационных исследований. Сформулирована цель диссертационной работы, поставлены основные задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описано современное состояние активного ТК металлических и композиционных материалов и изделий, включая основные области применения данного метода. Рассмотрены способы и схемы реализации активного ТК с использованием различных источников тепловой стимуляции на примере изделий из стали и углепластика, используемых в атомной энергетике. Приведены основные проблемы ТК композитов с возможными путями их решения. Проанализированы изменения в технике и методах ТК композитов, произошедшие в последнее пятилетие. Рассмотрены направления применения ТК при диагностике состояния металлических изделий и конструкций, используемых в нефтехимической промышленности и энергетике. Описаны коммерческие специализированные устройства ТК, принятые в качестве аналогов при разработке аппаратурной базы диссертационных исследований.

Вторая глава посвящена описанию алгоритмического обеспечения активного ТК и содержит результаты решения теоретических задач ТК, включая базовые зависимости динамических температурных сигналов от параметров дефектов. Особое внимание уделено ТК углепластика как наиболее популярного композиционного материала в авиастроении, а также перспективного материала в атомной энергетике, судостроении и автомобилестроении.

В частности, на основе решения трехмерной нестационарной задачи ТК рассчитаны зависимости безразмерного текущего контраста температуры C от поперечных

размеров, толщины (раскрытия) и глубины залегания дефектов, а также длительности тепловой стимуляции (времени нагрева). Для углепластикового композита данные зависимости показаны в качестве примера на Рисунке 1. Предложена методика оценки предельных возможностей ТК, основанная на сравнении теоретических значений температурного контраста с экспериментально определенным контрастом шума. Например, показано, что для многих типов углепластикового композита можно принять контраст шума $C_n \sim 5\%$ (при отношении сигнал/шум не менее 2). Тогда пересечение горизонтальной прямой, соответствующей вышеприведенному значению шума, с зависимостями расчетного контраста температуры от параметров дефектов дает предельное значение параметра обнаруживаемого дефекта. Например, из Рисунка 1 следует, что предельная глубина залегания воздушных расслоений различного размера в углепластике толщиной 5 мм при односторонней процедуре ТК составляет 3.3-4 мм, что соответствует опубликованным экспериментальным оценкам.

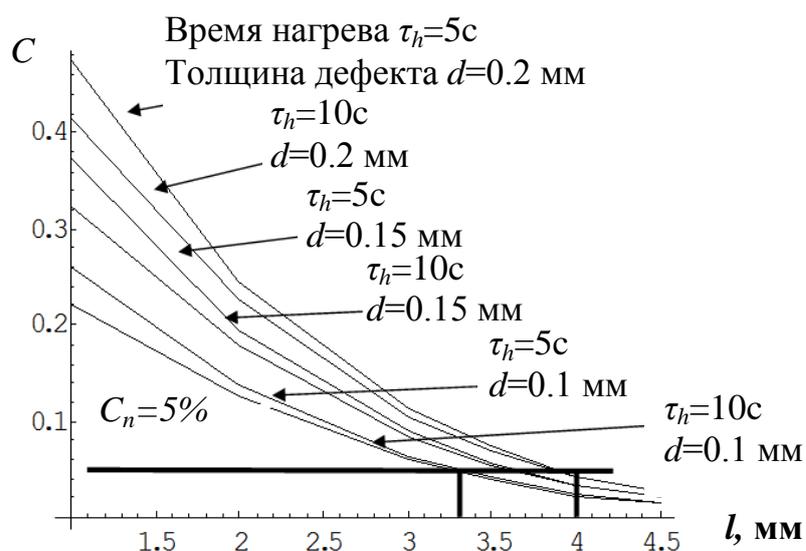


Рисунок 1 – Определение предельной глубины обнаружения воздушных расслоений в углепластиковом цилиндре с толщиной стенки 5 мм при одностороннем ТК

В качестве основного критерия сравнения экспериментальных процедур ТК и алгоритмов обработки данных выбрано отношение сигнал/шум:

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M (T_i - \bar{T}_{nd})^2 / M}}{\sigma_{nd}}, \quad (1)$$

где T_i - температура (или производный от нее сигнал) в i -м пикселе дефектной области, \bar{T}_{nd} - средняя температура в бездефектной области, M – число пикселей в выбранной дефектной области.

Третья глава посвящена описанию метода и аппаратуры ТК коррозии в металлических изделиях. Приводится анализ влияния конфигурации дефектов на распределение температуры и рассматривается эффективность применения алгоритма оценки коррозии согласно следующему «одномерному» уравнению:

$$\frac{\Delta L}{L} = 1 - \frac{T_{nd}}{T_d}, \quad (2)$$

где $\Delta L/L$ - относительный унос материала стенки, T_d и T_{nd} - соответственно температуры в дефектной и бездефектной зонах. Уравнение (2) было предложено В.П. Вавиловым с соавторами; в настоящем исследовании определены границы применимости уравнения (2) и предложена его модификация с учетом влияния конфигурации дефектов на распределение температуры (см. расчетный пример для двух моментов времени на Рисунке 2). Эффект «поперечной» диффузии тепла особенно заметен для дефектов малого размера (верхний ряд дефектов).

На Рисунке 2 показаны расчетные термограммы коррозионных дефектов различного размера в стали толщиной 5 мм, которые наглядно иллюстрируют феномен диффузии тепловой энергии во времени, что приводит к «расплыванию» температурных отпечатков дефектов, которое тем сильнее, чем меньше размер дефекта по какой-либо из «поперечных» координат.

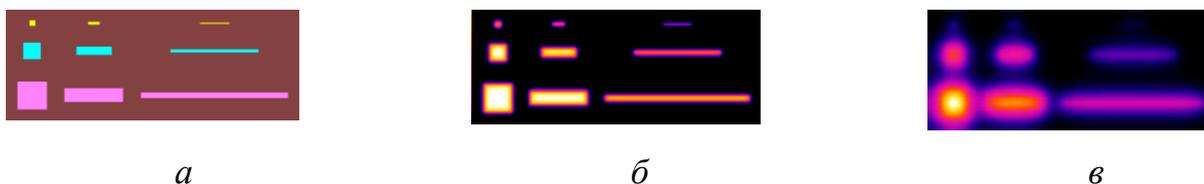


Рисунок 2 – Моделирование 25% коррозии в пластине из стали AISI 101 толщиной 5 мм, нагреваемой прямоугольным тепловым импульсом (размеры дефектов изменяются от 25x1 до 125x2,5 мм; программа ThermoCalc-6L): *a* – схема дефектов; *б* – $\tau=0,1$ с; *в* – $\tau=5$ с

Описана разработанная ИК термографическая система контроля коррозии (ИТСКК) для диагностики металлических контейнеров в полуавтоматическом режиме, включающая тепловизор ThermoCAM P65 HS, FLIR Systems (США) и/или NEC TH-9100, NEC Avio (Япония), две импульсные ксеноновые лампы с общей энергией 3,2 кДж и поворотное устройство (Рисунок 3).



Рисунок 3 – ИК термографическая система для контроля коррозии в цилиндрических изделиях

Рассмотрены результаты исследований по контролю коррозии в стандартных стальных (Ст45) образцах толщиной 6 и 10 мм с использованием различных источников тепловой стимуляции. Установлено преимущество конвективного метода нагрева для образца толщиной 6 мм по сравнению с импульсным оптическим нагревом, не обеспечивающим необходимый уровень поглощенной энергии. Обработку экспериментальных данных проводили с помощью программы ThermoFit Pro, разработанной В.В. Ширяевым в НИ ТПУ. Результаты исследований приведены в Таблице 1.

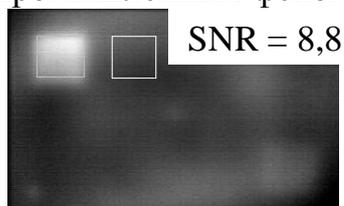
Таблица 1 – Эффективность применения в активном ТК различных способов тепловой стимуляции при испытаниях стандартного образца из стали толщиной 6 мм, содержащего 9 коррозионных зон различного размера

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

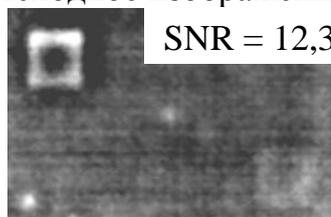
Результаты аналогичных исследований по контролю коррозии в стальных (Ст10) образцах толщиной 1 и 2 мм с использованием различных источников тепловой стимуляции и последующей обработкой различными алгоритмами подтвердили

преимущество 30 кВт оптического источника нагрева и 4 кВт конвекционного нагревателя. Критерием оценки выявленных дефектов являлось отношение сигнал/шум. ИК термограммы стальной пластины толщиной 2 мм, полученные при нагреве промышленным феном и галогеновыми лампами, приведены на Рисунке 4.

Нагрев промышленным феном (4 кВт)

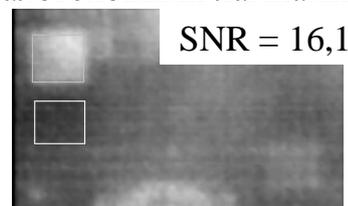


Исходное изображение

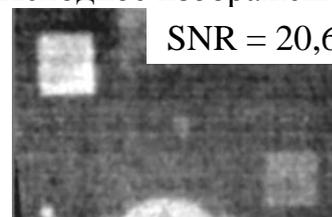


АГК

Нагрев галогеновыми лампами (30 кВт)



Исходное изображение



АГК

Рисунок 4 – Результаты выявления скрытой коррозии с применением метода анализа главных компонент (АГК)

Для определения предельных возможностей ТК коррозии проведено численное решение трехмерной задачи теплопроводности для стального изделия толщиной 1, 5 и 10 мм, содержащего область коррозии размером 10×10 мм. Графически результаты представлены на Рисунке 5. Уровень шума по критерию контраста был установлен равным 10 %, что соответствует окрашенной металлической поверхности.

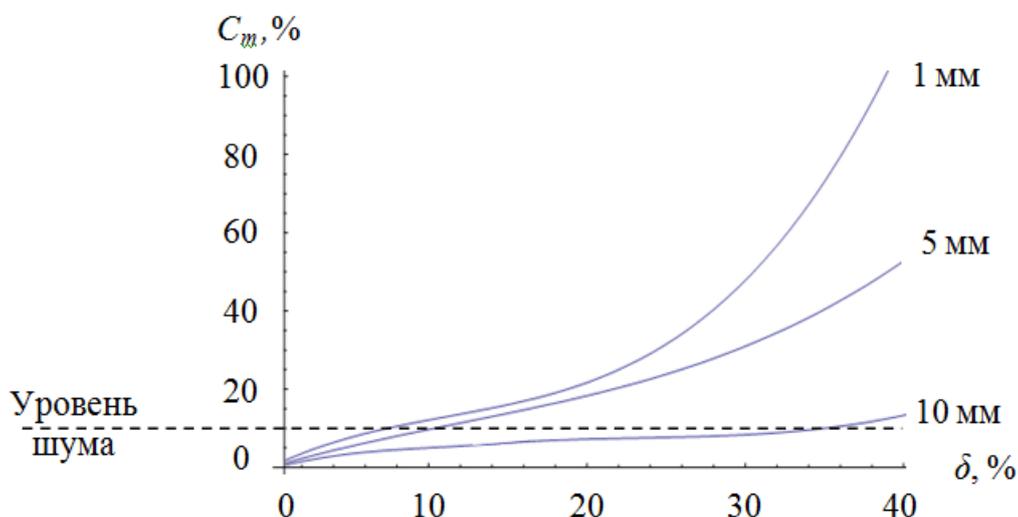


Рисунок 5 – Зависимость максимального контраста температуры над коррозионными дефектами размером 10x10 мм в стали при импульсном нагреве

В рамках разработанной методики контроля стальных цилиндров предусмотрено использование нейронной сети (разработка Д.А. Нестерука, НИ ТПУ) для преобразования результатов ТК при каждом положении объекта контроля в бинарную карту дефектов, причем, после окончания процесса контроля осуществляют компьютерное «сшивание» отдельных карт. Панорамная бинарная карта (развертка) цилиндра показана на Рисунке 6.

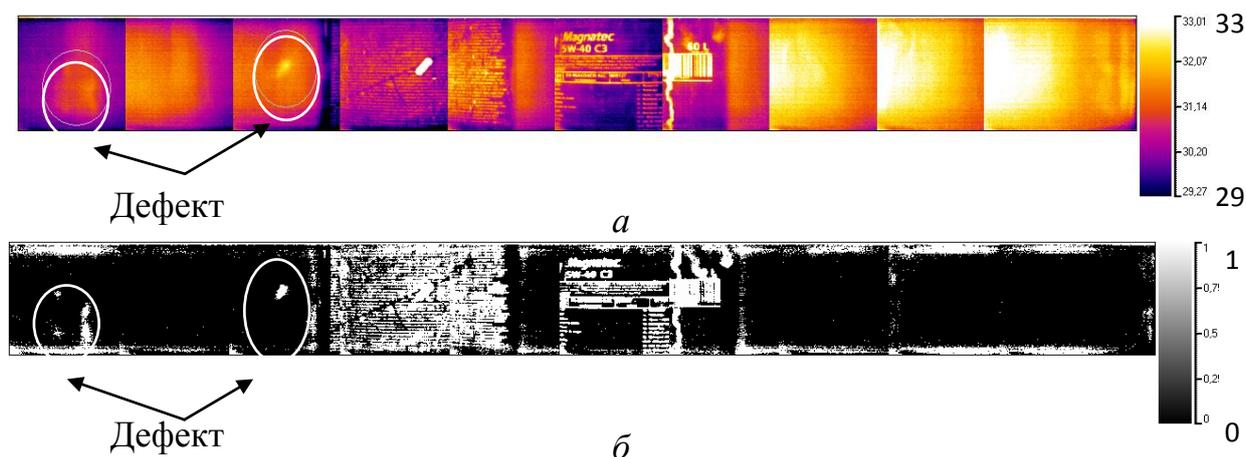


Рисунок 6 – Развертка «сшитых» ИК термограмм ТК стальных цилиндров: *a* – исходное изображение; *б* – бинарное изображение, полученное с использованием нейронной сети (белым цветом показаны дефектные зоны; помимо дефектных зон видны бумажные маркеры, наклеенные на поверхность цилиндра)

В диссертации выполнено сравнение разработанной установки ТК коррозии с мировыми аналогами. Показано, что данная установка соответствует аналогам, а по ряду показателей, таких как гибкость применения, разнообразие алгоритмов обработки ИК изображений и цена, превосходит их.

Глава 4 посвящена реализации ТК при испытаниях цилиндрических изделий из углепластика, выполненных путем намотки, включая обнаружение дефектов в виде расслоений и экспрессное определение ТФХ.

Подробно изучены характеристики аддитивных и мультипликативных шумов, сопровождающих процедуры ТК. Несмотря на высокий коэффициент излучения углепластика, нагрев мощным оптическим излучением сопровождается значительной отраженной помехой, которая относится к аддитивным шумам и для цилиндрических изделий носит существенно зеркальный характер. Влияние отраженного окружающей средой излучения источника нагрева заметно даже для двухсторонней процедуры ТК. На графике Рисунка 7а показан профиль температуры задней поверхности, на который

наложен шумовой сигнал отраженного излучения. После принятия мер по экранировке оптического источника профиль температуры (см. Рисунок 7б) приобретает «классический» вид. Следует заметить, что предельной величиной аддитивного шума является белый шум ИК детектора, обуславливающий температурное разрешение тепловизора ΔT_{res} , которое, как было отмечено выше, составляло 20 мК. Таким образом, принципиальное ограничение ТК по параметрам обнаруживаемых дефектов связано с величиной ΔT_{res} .

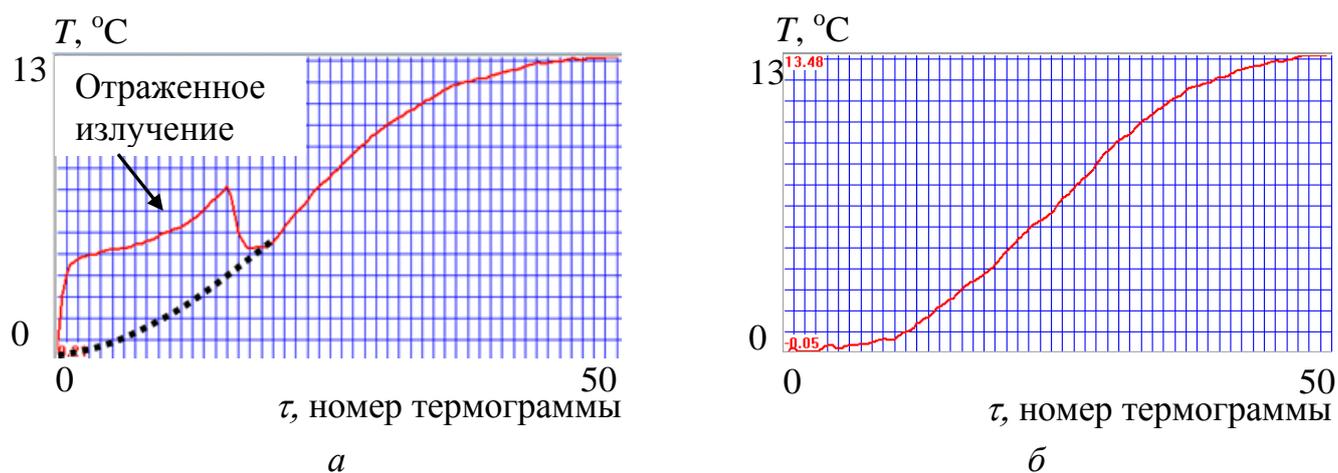
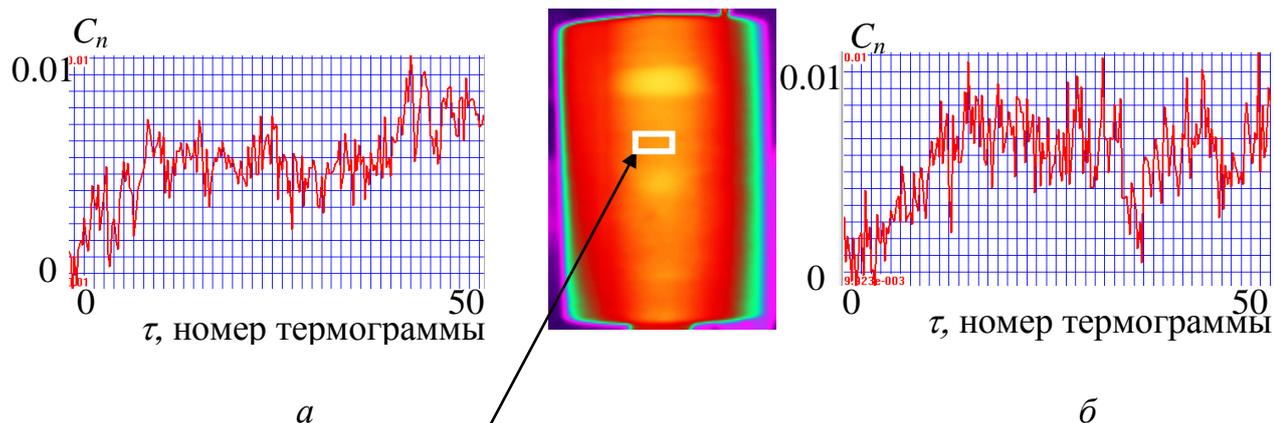


Рисунок 7 – Влияние отраженного излучения источника нагрева на профили температуры при двухстороннем ТК углепластика: *а* – нагрев галогеновой лампой 1 кВт в течение 5 с, углепластик толщиной 4,1 мм; *б* – то же, что *а*), объект контроля экранирован от излучения лампы, отраженного окружающей средой

Типовой подход к оценке шумов состоит в оценке стандартного отклонения динамического температурного сигнала в бездефектных зонах $\sigma_n(\tau)$ и текущего контраста шума C_n^{rum} . Примеры изменения контраста шума во времени для односторонней процедуры ТК образцов из углепластика показаны на Рисунке 8. Данные на рисунке иллюстрируют пороговые значения контраста шума на уровне 1 % непосредственно после окончания нагрева.

В 4-й главе содержатся результаты статистической оценки эффективности алгоритмов обработки экспериментальных результатов с использованием отношения сигнал/шум S в качестве критерия оптимизации. Ряд результатов иллюстрирует Таблица 2. Видно, что в конкретной задаче ТК оптимальным алгоритмом является анализ главных компонент (АГК).



Зона интереса (определение контраста шума C_n)

Рисунок 8 – Изменение контраста шума во времени на стадии охлаждения углепластиковых цилиндров (нагрев в течение 7 с источником на галогеновых лампах мощностью 30 кВт): *а* – образец №1; *б* – образец №2

Таблица 2 – Отношение сигнал/шум при выявлении расслоений в углепластике на глубине 1,3 и 2,6 мм

Изображение	Отношение сигнал/шум S
Фурье-фазограмма (2-я частота)	2,26
Фурье-фазограмма (3-я частота)	1,60
Вейвлет-фазограмма (функция Морле, сдвиг 10, масштаб 100)*	4,43
Вейвлет-фазограмма (функция Морле, сдвиг 10, масштаб 50)	3,20
АГК (2-я компонента) ***	5,00
АГК (3-я компонента)	6,20
Исходная термограмма через 1,1 с после окончания нагрева	2,10

* Приведены специфические параметры вейвлет-преобразования

** АГК – анализ главных компонент

Описан прототип теплового дефектоскопа (Рисунок 9) широкого применения, в том числе для выявления дефектов композиционных материалов, в особенности, ударных повреждений в углепластиковых композитах. Основными элементами прибора являются: регистратор ИК излучения - тепловизор, источник тепловой стимуляции оптического типа и компьютер. При наличии специального программного обеспечения, данный дефектоскоп может быть использован в качестве теплового томографа.



Рисунок 9 – Прототип теплового дефектоскопа с галогеновым источником нагрева

В рамках диссертационной работы была разработана методика проведения активного ТК металлических и композиционных материалов и изделий (алгоритм представлен на Рисунке 10).

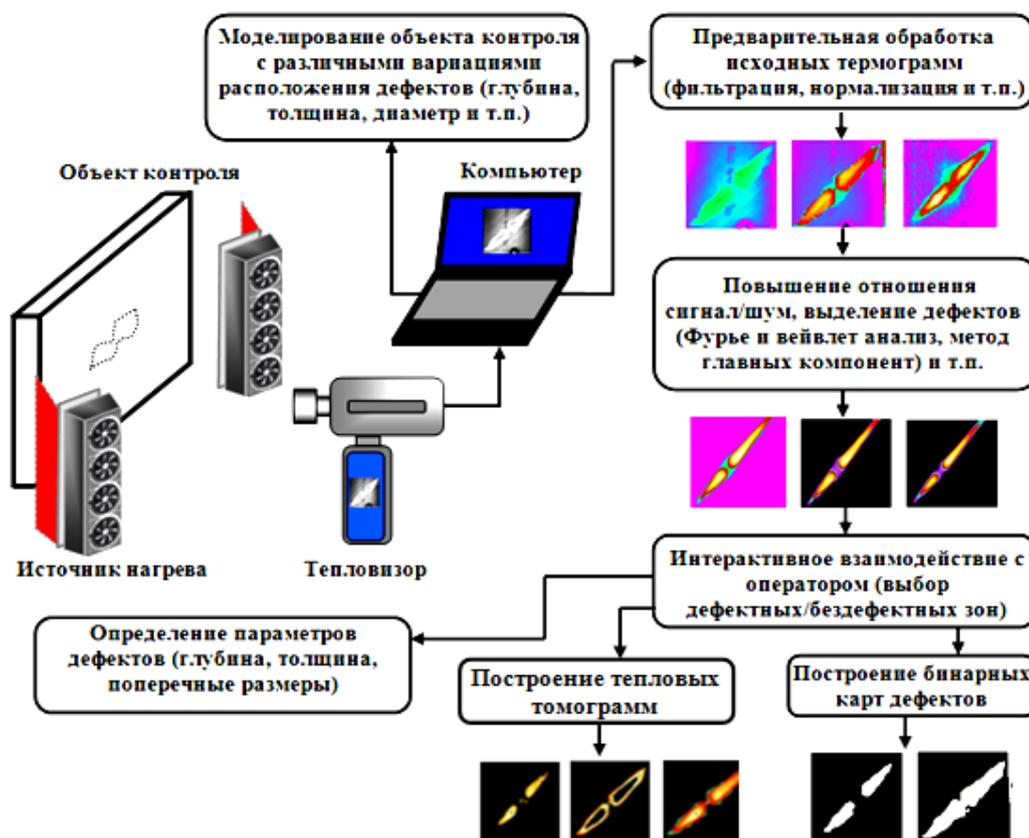


Рисунок 10 – К методике проведения активного ТК металлических и композиционных материалов

Проведение испытаний согласно разработанной методике подразумевает использование ИК тепловизора, источников нагрева различного типа, компьютера типа «лэп-топ» и пакета оригинальных компьютерных программ для моделирования задач ТК и обработки экспериментальных данных методами корреляционного анализа, Фурье- и вейвлет-преобразования и анализа главных компонент (в разработке системы принимали участие сотрудники НИ ТПУ В.П. Вавилов, Д.А. Нестерук, В.В. Ширяев).

В диссертации приведены экспериментальные результаты по ТК дефектов в углепластиковых образцах цилиндрической формы производства ОАО «ННКЦ», г. Новоуральск. Примеры результатов, полученных в односторонней процедуре с использованием оптического равномерного нагрева и различных алгоритмов обработки ИК термограмм показаны на Рисунке 11.

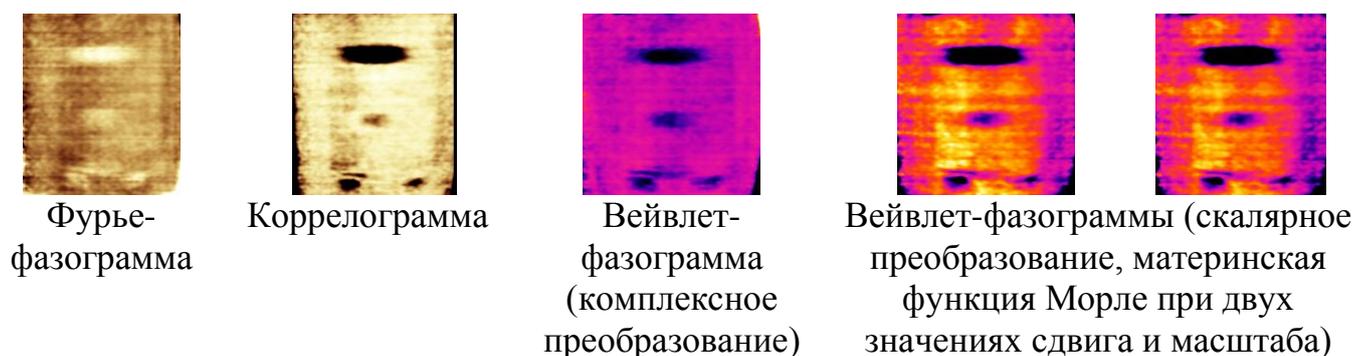
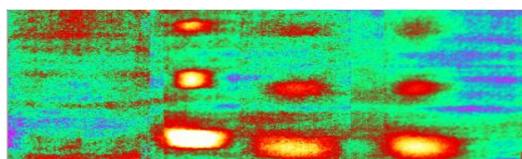


Рисунок 11 – Эффективность обработки результатов ТК расслоений в углепластиковых цилиндрах (нагрев галогеновыми лампами мощностью 2 кВт)

Сравнение теории и эксперимента проводили по текущему контрасту температуры, не зависящему от мощности нагрева. В большинстве исследованных случаев расхождение данных не превышало 10 %.

В соответствии с теорией ТК, оптимальные результаты по выявлению дефектов по всей глубине изделия имеют место в двухсторонней процедуре. На Рисунке 12 приведена синтезированная термограмма развертки стандартного образца из углепластика, на которой обнаруживаются все 9 дефектов на глубинах от 1,3 до 4,3 мм.



Глубина дефектов: 1,3 мм 2,6 мм 4,3 мм

Рисунок 12 – Результаты двухстороннего ТК цилиндрического изделия из углепластика толщиной 5 мм при нагреве галогеновой лампой мощностью 2 кВт (лампа расположена вдоль оси цилиндра, длительность нагрева 10 с; «сшиты» изображения 3-й главной компоненты из 6-ти изображений)

На примере углепластикового цилиндра рассмотрен метод экспрессного определения анизотропных компонент температуропроводности α_x , α_y , α_z (компонента α_z названа «сквозной», а компоненты α_x , α_y - «поперечными») с использованием щелевой маски. «Сквозную» компоненту температуропроводности определяли по методу Паркера, предложенному в 1961 г. В рамках диссертационных исследований акцент был сделан на разработку методики оценки «поперечных» компонент температуропроводности, идея которой предложена J.-C. Krupar с соавторами: между исследуемым образцом и источником равномерного нагрева размещают полосовую

маску, создающую текстуру периодического нагрева на передней поверхности образца, температура задней поверхности образца регистрируется тепловизором (Рисунок 13).

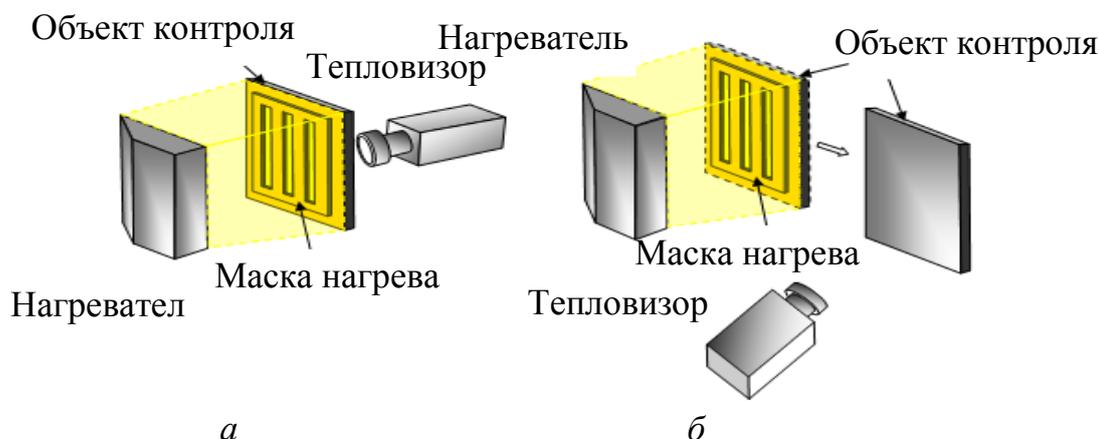


Рисунок 13 – Схема двухсторонней (а) и односторонней процедур (б) определения ТФХ с использованием полосовой маски

В диссертации проведен анализ данной методики и показана ее предпочтительность по сравнению с масками произвольной формы. Использование полосовой маски при испытаниях образца из углепластика толщиной 5,4 мм проиллюстрировано графиками на Рисунке 14. Пространственное распределение температуры показано на Рисунке 14а, 3-я несущая частота отчетливо проявляется в спектре Фурье (Рисунок 14б), изменение температуры во времени приведено на Рисунке 14в, логарифмические кривые показаны на Рисунке 14г, причем прямая линия красного цвета, соответствующая 3-й частоте и расположенная ниже нулевой оси (Рисунок 14г), позволяет определить температуропроводность материала.

С помощью программы ThermoCalc-6L (НИ ТПУ) выполнены многочисленные расчеты различных вариантов масок нагрева, в том числе, квадратной и круглой формы. Для определения следующей «поперечной» компоненты коэффициента температуропроводности полосовую маску поворачивают на 90° и повторяют процедуру ТК. Для изделия из углепластика, показанного на Рисунке 12а, экспериментально определены три компоненты анизотропной температуропроводности: $\alpha_x=10,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\alpha_y=2,88 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\alpha_z=2,92 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Глава 5 посвящена исследованию нового метода активной ИК термографии, а именно, использованию в качестве источника воздействия на контролируемый объект

электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне (совместные исследования с Университетом г. Бордо, Франция).

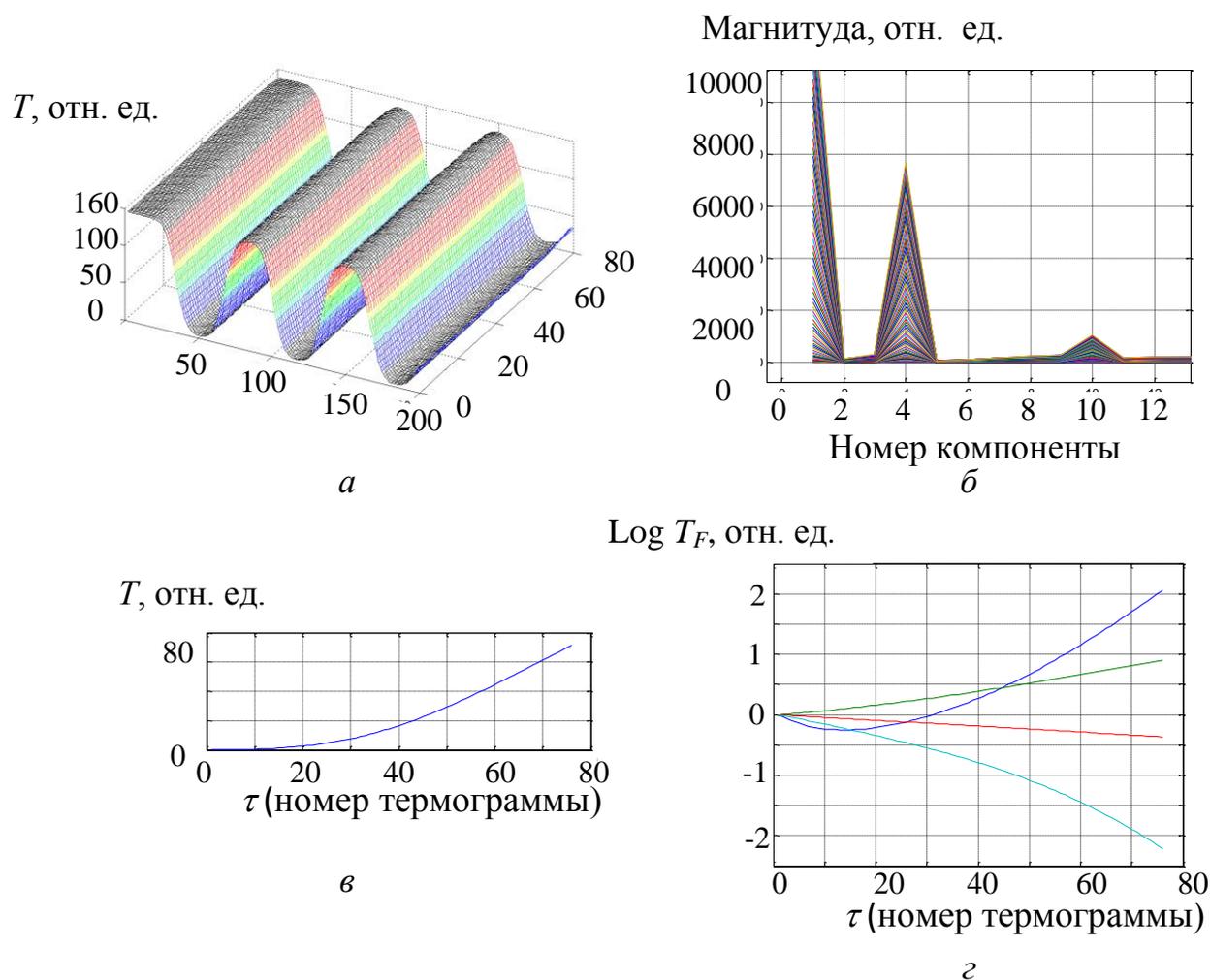


Рисунок 14 – Использование полосовой маски с 3-мя прорезями при длительности нагрева 3 секунды для определения ТФХ углепластика толщиной 5,4 мм: *а* – распределение температуры при 3 с; *б* – Фурье-спектр (частота 3, 4-я компонента спектра, что соответствует трем прорезям маски); *в* – изменение температуры во времени; *г* – изменение логарифма отношения (начиная с нулевого времени $\tau_{\text{zero}} = 2.5$ с) во времени

Схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 15. Терагерцовое (ТГц) излучение мощностью 40 мВт на длине волны 2,8 мм, генерируемое диодом Ганна, пропускают через объект контроля. Интенсивность ТГц излучения, зависящее от наличия скрытой воды, преобразуется в тепловое поле тонкой мишени тера-термоконвертора и регистрируется стандартной ИК камерой.

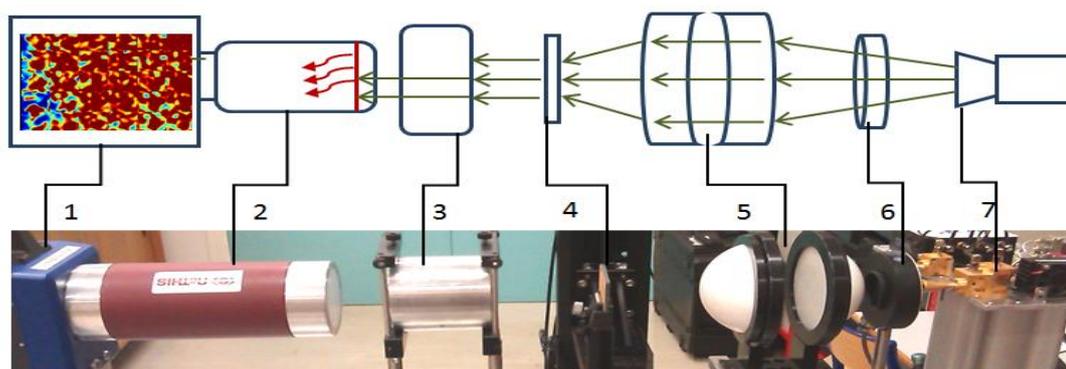
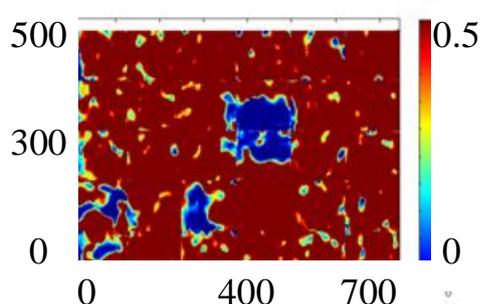
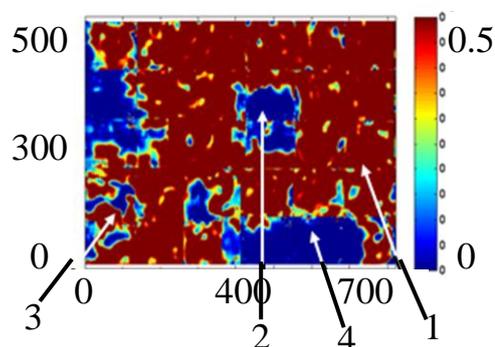


Рисунок 15 – Схема экспериментальной установки (1 – ИК камера, 2 – термоконвертер, 3 – терагерцовый объектив, 4 – контролируемый объект, 5 – система линз, 6 – механический затвор, 7 – ТГц источник)

Результат контроля показан на Рисунке 16. Для сравнения температурных сигналов, характеризующих различия в коэффициенте пропускания различных участков сотовых панелей, были проанализированы 4 последовательности ИК изображений, относящихся соответственно к бездефектной зоне, участку с повышенной плотностью за счет спаивания ячеек, алюминиевым маркерам и ячейкам, наполненным водой (соответственно зоны 1, 2, 3 и 4 на Рисунке 16).



а



б

Рисунок 16 – «Сшитое» ТГц изображение стеклопластиковой сотовой конструкции: а – конструкция с алюминиевыми маркерами, без воды; б – конструкция с алюминиевыми маркерами и водой

Основные научные результаты и выводы

- В диссертации решены следующие научно-технические задачи: 1) разработана методика активного ТК скрытой коррозии в металлических изделиях толщиной до 6 мм с количественным определением степени уноса материала в зонах с поперечным размером более 10 мм; 2) разработана методика определения «поперечных» компонент анизотропных ТФХ композиционных материалов на основе анализа

изменения логарифмической «Фурье-температуры» объектов контроля во времени с использованием пространственной щелевой маски, задающей несущую пространственную частоту; 3) разработана методика проведения ТК металлических и композиционных материалов и изделий с применением источников нагрева и ИК тепловизоров различных типов, а также с использованием моделирующих программ и современных алгоритмов обработки «временных» последовательностей ИК изображений; 4) выполнен статистический анализ эффективности различных алгоритмов обработки нестационарных ИК термограмм (с применением Фурье- и вейвлет-преобразований, анализа главных компонент, корреляционного анализа и др.); 5) разработан прототип экспериментального ИК теплового дефектоскопа с универсальным спектром применения для реализации вышеупомянутых способов ТК; 6) исследована возможность применения метода терагерцовой ИК термографии для контроля воды в композиционных сотовых конструкциях.

- Количество решений обратных задач активного ТК, используемых для дефектометрии, значительно меньше количества решений прямых задач. Это объясняется как чисто математическими трудностями решения некорректно поставленных задач, так и сравнительно низким уровнем применения количественного ТК в промышленности, где роль данного метода в большинстве случаев сводится к “чистой” дефектоскопии. В настоящем исследовании определены границы применимости ранее предложенной методики оценки степени уноса материала металлической стенки путем определения температурного контраста.
- Базируясь на опыте исследований ТПУ, обобщены алгоритмы обработки ИК изображений, включая тривиальную фильтрацию, полиномиальную аппроксимацию, Фурье- и вейвлет- преобразование, метод анализа главных компонент, корреляционный и статистический анализ. В качестве стандартного критерия эффективности вышеупомянутых алгоритмов в настоящих диссертационных исследованиях принято отношение сигнал/шум.
- Выполнено теоретическое трехмерное моделирование задач ТК коррозии с помощью модифицированной программы ThermoCalc-3D. Разработан подход к определению предельных возможностей ТК коррозии на основе сравнения расчетных данных и экспериментальных значений шумового контраста C_n , который характеризует

любой контролируемый материал. Например, при реалистическом значении $C_n \sim 5\%$ в стали толщиной 1 мм возможно обнаружение уноса материала до 3 %, а в стали толщиной 10 мм предельная обнаруживаемая коррозия составляет около 9 %.

- Проведены экспериментальные исследования стальных оболочек, включая исследование отдельных функциональных, эксплуатационных, технических характеристик лабораторной системы ТК.
- Обобщены процедуры активного ТК изделий из углепластикового композита цилиндрической формы, включая оптическую, конвективную и ультразвуковую стимуляцию.
- Экспериментально определены параметры тепловых шумов при ТК углепластика. Установлено, что наружная поверхность цилиндрических углепластиковых изделий характеризуется шумом на уровне 4–8% независимо от процедуры испытаний.
- В стандартных образцах из углепластика толщиной 5,4 мм при использовании двухсторонней процедуры обнаруживались дефекты по всей толщине образцов. В односторонней процедуре обнаруживались дефекты на глубинах до 1,6 мм. Оптимальным видом нагрева был оптический с помощью источника на галогеновых лампах мощностью 30 кВт.
- Экспериментально определены «поперечные» компоненты температуропроводности углепластикового цилиндра с использованием щелевой маски. В частности, для углепластиковых цилиндров компоненты температуропроводности определены в следующем виде: $\alpha_x = 10,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ (вдоль волокон намотки цилиндров) и $\alpha_y = 2,88 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ (поперек волокон намотки цилиндров).
- Электромагнитное излучение ТГц диапазона, которое является неионизирующим и легко проходит сквозь композиционные материалы, не содержащие углеродные волокна, может быть эффективно использовано для обнаружения воды в сотовых конструкциях, используемых в авиастроении. Скорость испытаний, достигающая около 1 м²/ч, позволяет осуществлять 100 %-й контроль объектов большой площади.
- По результатам диссертационных исследований опубликовано 18 работ, в том числе 10 статей в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (1 статья – в журнале с импакт-фактором более 2), и 2 статьи в рецензируемых

изданиях из списка ВАК. Получен 1 патент на изобретение и 2 патента на полезные модели. Результаты работы используются в Новоуральском научно-конструкторском центре (ОАО «ННКЦ»), ФГУП «ГосНИИ гражданской авиации», а также в учебном процессе в Томском политехническом университете.

Основные результаты диссертации изложены в публикациях:

1. **Чулков А.О.** A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts / Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Plesovskih A.B. // Composites: Part B: Engineering. - 2015 - Vol. 68. - p. 375-384.
2. **Чулков А.О.** Comparing thermal stimulation techniques in infrared thermographic inspection of corrosion in steel / Vavilov V.P. // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. - 2015 - Vol. 81 - p. 1-9.
3. **Чулков А.О.** Detecting hidden water in honeycomb composite structures by using Terahertz thermography / Vavilov V.P., L. Gaverina, C. Pradere, J.-C. Batsale// Russian Journal of Nondestructive Testing - 2015 - Vol. 51 - №. 8. -p. 520–523.
4. **Чулков А.О.** Evaluating Severity of Impact Damage in CFRP by Determining Thermal Effusivity and Diffusivity / Vavilov V.P., Derusova D.A.// WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. - 2014 - Vol. 9. - Issue 1. - p. 251-260.
5. **Чулков А.О.** An apparatus for the active thermal testing of corrosion in steel cylindrical containers and test results / Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Shiryayev V.V.// Russian Journal of Nondestructive Testing. - 2013 - Vol. 49 - №. 11. - p. 619-624.
6. **Чулков А.О.** 'Classical' Thermal NDT of Hidden Defects: Passing from Defection to Defect Characterization / Vavilov V.P., Derusova D.A.// Latest Trends in Applied and Theoretical Mechanics: proceedings of the 10th International conference on applied and theoretical mechanics (MECHANICS '14), Italy, June 3-5, 2014. - Greece: WSEAS Press. 2014 - p. 206-212.
7. **Чулков А.О.** IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation / Vavilov V.P., Derusova D.A.// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. - 2014 - Vol. 9105, Article number 91050J. - p. 1-7.
8. **Чулков А.О.** Detecting corrosion in thick metals by applying active IR thermography / Vavilov V.P.// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. - 2012 - Vol. 8354 - p. 1-12.
9. **Чулков А.О.** Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University, Russia / Vavilov V.P., Derusova D.A. // Proceedings of 1st Asia QIRT. - 2015 - p. 9 (avail. on CD).
10. **Чулков А.О.** Infrared Testing of CFRP Components: Comparisons of Approaches using the Tanimoto Criterion / Sojasi S., Maldague X., Vavilov V.P., et.al. // Proceedings of NDT in Canada 2015 Conference. - 2015 - p. 8.

11. **Чулков А.О.** Обнаружение воды в сотовых композиционных конструкциях методом терагерцовой термографии/ Вавилов В.П., Л. Гаверина, К. Прадере, Ж.-К. Батсаль// Дефектоскопия. - 2015 - №. 8. -С. 72-76.
12. **Чулков А.О.** Установка и результаты активного теплового контроля коррозии в стальных цилиндрических контейнерах / Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В.// Дефектоскопия. - 2013 - №. 11. - С. 15-20.
13. **Чулков А.О.** Thermal NDT of Composites in the Aero Space Industry: A Quantitative Approach / Vavilov V.P. // Proceedings of 11th European Conference on Non-Destructive Testing. Brno, October 6-10, 2014 - p. 1-10.
14. **Чулков А.О.** Тепловой контроль композиционных материалов в авиакосмической промышленности: возрождение интереса и направления применения / Вавилов В.П., Дерусова Д.А., Swiderski W. // В мире неразрушающего контроля. - 2014 - №. 2(64). - С. 47-52.
15. **Чулков А.О.** Анализ влияния "черного" покрытия на обнаружение коррозии в алюминии методом активной инфракрасной термографии [Электронный ресурс] /Вавилов В.П.// Вестник науки Сибири. - 2014 - №. 2 (12). - С. 40-45. - Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/992>.
16. **Чулков А.О.** Неразрушающий контроль ударных повреждений в углерод-углеродном композите методом ультразвуковой ИК термографии / Дерусова Д.А.// Международный научно-исследовательский журнал. - 2014 - №. 1-1(20). - С. 45-48.
17. **Чулков А.О.** Экспериментальное определение коррозии в стальных изделиях методом активной инфракрасной термографии / Международный научно-исследовательский журнал. - 2014 - №. 1-1(20). - С. 48-51.
18. **Чулков А.О.** Энергоэффективный тепловой дефектоскоп на базе светодиодного источника нагрева для определения теплофизических характеристик и оценки коррозии металлических конструкций, используемых в атомной энергетике // Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодежного форума: в 2 т., Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: 2014 - Т. 1 - С. 11-15.
19. **Чулков А.О.** Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля цилиндрических металлических изделий / Вавилов В.П., Ширяев В.В.// Патент на полезную модель № 142185(13) U1, дата приоритета 03.12.2013, Опубликовано: 20.06.2014, Бюлл. № 17.
20. **Чулков А.О.** Тепловой дефектоскоп / Вавилов В.П., Ширяев В.В.// Патент на полезную модель № 144096(13) U1, дата приоритета 12.03.2014, Опубликовано: 10.08.2014, Бюлл. № 22.
21. **Чулков А.О.** Устройство для бесконтактного определения коэффициента температуропроводности твердых тел / Вавилов В.П., Ширяев В.В.// Патент на изобретение № 2549549(13) С1, дата приоритета 26.03.2014, Опубликовано: 27.04.2015, Бюлл. № 12.