

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»

*На правах рукописи*



МОСКОВЧЕНКО АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
ПОКРЫТИЙ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ  
ПРОЗРАЧНОСТЬЮ**

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,  
изделий, веществ и природной среды

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

**Чулков Арсений Олегович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Официальные оппоненты:

**Лобода Егор Леонидович**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физическая и вычислительная механика», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

**Клопотов Анатолий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

Защита состоится «27» сентября 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.13,  
кандидат технических наук, доцент



Шевелева Е. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационных исследований** обусловлена расширяющимся применением полимерных композиционных материалов (ПКМ) в изделиях современной авиационной техники, а также внедрением элементов, выполненных из различных материалов методом аддитивных технологий. Обнаружение характерных дефектов ПКМ вызывает трудности при использовании традиционных методов неразрушающего контроля (НК) и требует разработки специальных подходов неразрушающих испытаний. Практическая оценка степени критичности выявленных дефектов предъявляет повышенные требования к задаче дефектometрии. Активный тепловой контроль (ТК) регламентирован как один из основных методов НК на зарубежных предприятиях аэрокосмической промышленности. Современные наработки в области данного метода демонстрируют его перспективность для исследований ПКМ, а также способность компенсировать недостатки других методов НК. В связи с этим наблюдается повышение интереса к тепловому методу НК со стороны отечественных предприятий авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности. В силу вышесказанного, разработка новых методов тепловой дефектоскопии и дефектometрии актуальна с точки зрения повышения эффективности НК ответственных элементов авиационных конструкций как на стадии их изготовления, так и эксплуатации.

### **Степень разработанности темы**

В России первые исследования в области активного ТК многослойных материалов были выполнены в 1970-1980-х годах и описаны в работах В.П. Вавилова, Ю.А. Попова, Н.А. Бекешко, Л.А. Брагиной, В.В. Ширяева, Д.А. Рапопорта и др. Обзор классических принципов, методов и моделей активного ТК выполнен В.П. Вавиловым, а различные подходы активного ТК при испытаниях композитов содержатся в работах F. Ciampa, S. Gholizadeh, R. Yang. В настоящее время исследования в области активного теплового контроля (в зарубежной литературе упоминается как инфракрасная (ИК) термография) проводятся во

многих мировых научно-исследовательских лабораториях и университетах. Наиболее заметными являются группы X. Maldague в Университете Лавалья (Канада), J.-C. Batsale в Университете Бордо (Франция), S. Maierhofer в Институте исследования материалов (Германия), S. Sfarra в Университете Аквила (Италия). Кроме того, передовые исследования в данной области ведут крупные компании и корпорации, в частности, NASA, Europe Space Agency (ESA), Boeing, Airbus, Automation Technologies и др. В России исследования в области активного ТК проводят группы В.П. Вавилова (НИ ТПУ, г. Томск), О.Н. Будагина (ЦНИИ СМ, г. Хотьково), В.А. Захаренко (ОмГТУ, г. Омск), В.Н. Чернышова (ТГТУ, г. Тамбов), М.И. Щербакова (ИРТИС, г. Москва), а также С.А. Смотрова и А.В. Смотров (ЦАГИ им. Е.В. Жуковского, г. Жуковский), Е.В. Абрамова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва), А.В. Лукьянов (ИрГУПС, г. Иркутск), В.П. Вагин (АО «Композит», г. Королев).

Настоящая диссертация является продолжением научных исследований в области активного ТК, выполненных в Томском политехническом университете и изложенных в диссертациях В.С. Хорева, А.О. Чулкова, Д.А. Дерусовой, П. Янъяна, и более ранних исследователей. Ряд исследований, результаты которых приведены в настоящей работе, были выполнены в рамках научных стажировок соискателя в научной группе профессора S. Maierhofer в Институте исследования материалов (г. Берлин, Германия) и в научной группе профессора M. Švantner в Университете Западной Богемии (г. Пльзень, Чехия).

**Цель исследования** – разработка методов обнаружения дефектов в авиационных ПКМ с различной оптической прозрачностью, а также оценки параметров дефектов и толщины напыленных покрытий с использованием импульсного ТК.

### **Задачи исследования**

- Провести сравнительный анализ эффективности известных теоретических и экспериментальных методов оценки глубины залегания дефектов в ПКМ при импульсном нагреве.

- Разработать метод оценки глубины залегания дефектов в оптически непрозрачных ПКМ.
- Разработать метод оценки глубины залегания дефектов в полупрозрачных ПКМ для оптического излучения нагрева.
- Разработать метод количественной оценки толщины металлических покрытий, выполненных методом термического напыления.

### **Научная новизна**

- Разработан алгоритм определения глубины залегания расслоений в ПКМ на базе нейронных сетей (НС), обеспечивающий ошибку не более 8%, что существенно ниже ошибок дефектометрии (10-30%), полученных на основе аналитических решений.
- Алгоритмы дефектометрии на базе НС доказали эффективность для полупрозрачных ПКМ по сравнению с подходами, основанными на предположении о поверхностном характере нагрева.
- Разработан метод оценки толщины металлических CrFe покрытий, основанный на отсечке пороговой величины кажущейся тепловой инерции. Продемонстрирована эффективность данного метода для оценки толщины покрытий в диапазоне 0.1 – 1 мм на подложках из стали, нанесенных методом термического напыления.
- Разработана методика определения глубины залегания дефектов малого размера, для которых трехмерная диффузия тепла существенно влияет на параметры ТК. Методика основана на нелинейной подгонке экспериментальных температурных кривых методом наименьших квадратов к упрощенной аналитической модели, учитывающей влияние трехмерной теплопроводности и коэффициент отражения импульсных тепловых волн на границах дефектов.

### **Практическая значимость работы**

Разработанные алгоритмы, формулы и методики тепловой дефектоскопии и дефектометрии предназначены для практического применения в научно-исследовательской работе, учебном процессе, а также могут быть использованы в

составе программного обеспечения тепловых дефектоскопов промышленного применения.

### **Методологические основы и методы исследования**

В диссертационной работе использованы теоретические основы теплового неразрушающего контроля, построенные на фундаментальной теории теплопроводности для одномерных твердых тел, описанной А.В. Лыковым, Н. Carslow и J. Jaeger. Аналитические методы решения одномерных задач теплопроводности в многослойном материале, а также численные методы решения трехмерных задач теплопроводности были использованы для моделирования нестационарного теплопереноса в твердых телах, содержащих структурные дефекты, неоднородности теплофизических характеристик материала, пустоты, заполненные воздухом, трещины и т. д. Для решения задач дефектометрии были применены методы решения обратных задач теплопроводности с использованием нелинейной подгонки (non-linear fitting) к аналитической модели. В работе использованы эмпирические методы, связанные с постановкой эксперимента, верификацией полученных данных с теоретическими результатами, а также выполнено сравнение полученных данных с результатами исследований других авторов. Используемые методы обработки температурных данных можно разделить на две категории: методы обработки последовательностей ИК термограмм с помощью пространственной и временной фильтрации, преобразования Фурье, метода термографической обработки сигнала (TSR, предложенный S. Shepard), алгоритмов на базе искусственных нейронных сетей, а также методов качественного и количественного анализа результатов температурных измерений, в частности, оценок отношения сигнал/шум, относительной ошибки измерения, стандартного отклонения.

### **Положения, выносимые на защиту**

- Искусственные НС позволяют определять глубину залегания дефектов в оптически полупрозрачных ПКМ, в то время как классические методы оценки

глубины, такие как импульсно-фазовая ИК термография и анализ производных, неприменимы для вышеуказанных материалов.

- Предварительная обработка термографических последовательностей изображений различными методами (TSR, преобразование Фурье, анализ главных компонент и т.п.) улучшает достоверность оценок глубины дефектов при использовании НС. Наилучшие результаты достигнуты при использовании изображений первой логарифмической производной по методу TSR.
- Концепция кажущейся тепловой инерции рекомендуется для использования в аналитических моделях и для количественной оценки параметров дефектов и ТФХ материалов в качестве замены анализа истинной тепловой инерции, что требует определения величины поглощенной энергии нагрева.
- Использование принципа пороговой отсечки величины кажущейся тепловой инерции позволяет оценивать толщину покрытий при условии существенного различия величин тепловой инерции покрытия и подложки.
- Глубина дефектов малых поперечных размеров (по отношению к глубине их залегания), в которых существенно влияние трехмерной теплопроводности, может быть определена на базе упрощенной аналитической модели с использованием алгоритмов нелинейной подгонки.

**Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов** подтверждается соответствием аналитических результатов исследования, полученных в предельных случаях, результатам численного моделирования и полученным экспериментальным данным. Теоретические результаты исследования не противоречат общепринятым научным данным и данным, полученным другими авторами. Валидация теоретических результатов проводилась при помощи трехмерного численного моделирования процесса переноса тепла в твердых телах с использованием пакетов Comsol Multiphysics и программы ThermoCalc-3D (Томский политехнический университет). Достоверность экспериментальных данных обеспечена применением современной высокочувствительной тепловизионной и измерительной аппаратуры.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационных исследований докладывались на конференциях Международного общества оптики и фотоники «Thermosense-2019», г. Балтимор, США, а также на Паназиатской конференции по количественной ИК термографии «QIRT 2019», г. Токио, Япония.

**Личный вклад автора** заключается в разработке и изготовлении образцов из углепластика и полилактида (PLA) с искусственными дефектами, а также создании трехмерных моделей процесса переноса тепла в программах ThermoCalc-3D и Comsol Multiphysics. Выполнены экспериментальные исследования, направленные на сравнение существующих методов количественной оценки глубины дефектов. Осуществлена предварительная обработка и подготовка экспериментальных данных для обучения нейронных сетей. Разработаны методики количественной оценки толщины покрытий и глубины залегания дефектов малых размеров в ранее неисследованных моделях полупрозрачных композитов.

### **Связь диссертационного исследования с научно-техническими грантами**

Диссертационные исследования связаны с выполнением грантов Российского научного фонда №17-19-01047 и № 19-79-00049, исследовательского гранта Немецкой службы академических обменов (DAAD) - Research Grants - Short-Term Grants, 2018 (57378443), гранта Российского фонда фундаментальных исследований №19-29-13004, гранта Европейского фонда регионального развития (EDRF) № CZ.02.1.01/0.0/0.0/18\_069/0010018, проекта Европейского космического агентства (ESA) «Non-contact NDI for Polymeric Composite Structures», контракт № 4000129336/19/NL/RA».

### **Публикации**

Соискателем опубликовано 15 работ, из них 12 по теме диссертации, в том числе 11 статей в изданиях, индексированных в базах данных SCOPUS и Web of Science, 6 статей в журналах Q2, 3 публикации в журналах из перечня ВАК. Одна из статей удостоена звания «Выбор редактора» (Editor's Choice Paper) в выпуске №8 (2021 г.) журнала «Materials» (ИФ 3.058).

## **Структура и объем диссертационных исследований**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 102 работы, содержит 120 страниц текста, 50 рисунков, 32 формулы, 12 таблиц и 2-х приложений.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначена актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Сформулированы основные цели и задачи, определен предмет и объект исследования. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор современного состояния методов неразрушающего контроля авиационных ПКМ, а также их сравнительный анализ. Рассмотрены известные термографические методы количественной оценки глубины залегания дефектов, на основании чего выявлены пробелы в существующих подходах для решения актуальных задач в области тепловой дефектометрии.

**Во второй главе** проанализирована эффективность восьми алгоритмов определения глубины залегания дефектов методом ИК-термографии. Проанализированы метод импульсно-фазовой термография (PPT), метод реконструкции термографического сигнала (TSR), метод кажущейся тепловой инерции (ATI), метод тепловых квадруполь с использованием преобразования Лапласа (TQ), метод раннего времени наблюдения (EO), метод подгонки к аналитической модели (NLF) и метод, основанный на применении искусственных нейронных сетей (NN). Сравнительный анализ данных методов проведен на теоретических и экспериментальных последовательностях ИК изображений, полученных при одностороннем ТК изделия из углепластика. Метод импульсно фазовой термографии оказался наиболее универсальным и эффективным в большинстве случаев. Выявленным недостатком данного метода, по сравнению с известным методом реконструкции теплового сигнала, является влияние диффузии тепла в поперечных направлениях, что ограничивает его применимость для

определения параметров дефектов с малыми поперечными размерами и значительной глубиной залегания. Метод реконструкции теплового сигнала обеспечивает максимальные значения отношения сигнал/шум, а результаты в меньшей степени зависят от неравномерности нагрева. Метод кажущейся тепловой инерции показал удовлетворительные результаты для дефектов на глубинах менее 1,5 мм, однако оказался более чувствительным к неравномерному нагреву и температурным шумам. Методы раннего времени наблюдения и преобразования Лапласа показали худшие результаты дефектометрии на зашумленных экспериментальных данных. Метод нелинейной подгонки к аналитической модели позволил идентифицировать интегральные ТФХ исследуемого материала, параметры нагрева и т. д., однако данный метод оказался наиболее трудозатратным при его применении к полноформатным ИК изображениям. Применение сложных моделей при подгонке позволяет учитывать сложные феномены ТК, например, влияние поперечной диффузии тепла. Наилучшие результаты дефектометрии были получены при использовании алгоритма на базе нейронных сетей. На рисунке 1 показана карта глубин дефектов для образца из углепластика с искусственными дефектами, полученная с помощью нейронной сети.



Рисунок 1 – Глубинограмма, полученная с использованием нейронной сети

Использование нейронных сетей позволило выявить дефекты размером  $20 \times 20$  мм, расположенные на глубине до 2 мм, а результаты дефектометрии оказались наиболее близкими к реальным параметрам дефектов по сравнению с другими методами. Рисунок 2 иллюстрирует значения средней относительной ошибки определения глубины дефектов с использованием всех проанализированных алгоритмов.

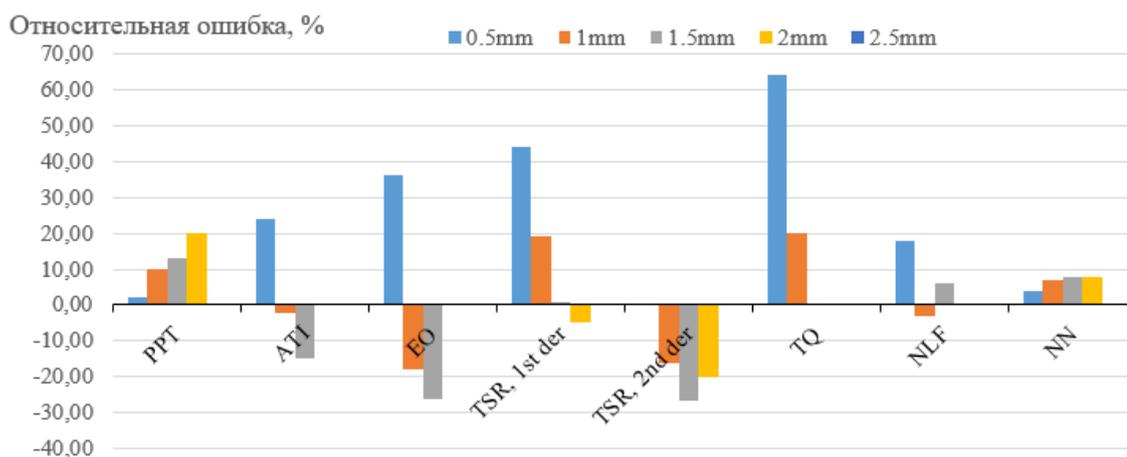


Рисунок 2 – Относительная ошибка определения глубины залегания дефектов на основе экспериментальных данных (отрицательные значения иллюстрируют недооценку глубины, а положительные - переоценку)

На основании проведенного анализа алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии было установлено, что для оценки глубины дефектов в полупрозрачных материалах наиболее перспективным является использование искусственных нейронных сетей. Аналитическое моделирование дефектов в полупрозрачных материалах является громоздким и сложным, а использование методов дефектометрии, основанных на поверхностном нагреве, неприменимы к полупрозрачным материалам, поскольку нагрев оптическими средствами происходит по всей толщине такого материала. Определение глубины дефектов с учетом поперечной диффузии тепла может быть реализовано на основе нелинейной подгонки к аналитической модели, учитывающей поперечную диффузию тепла. Данный подход является универсальным и подходит для различных материалов и дефектов, в отличие от нейронных сетей, которые необходимо обучать на конкретных материалах и изделиях.

**Третья глава** является логическим продолжением исследований, описанных в предыдущей главе, и посвящена разработке метода определения глубины дефектов в полупрозрачных материалах на основе искусственных нейронных сетей. В данной главе проведено сравнение эффективности использования импульсной и лазерной инфракрасной термографии при контроле полупрозрачных образцов из стеклопластика с искусственными расслоениями. Было показано, что максимальные значения отношения сигнал/шум могут быть достигнуты при

использовании лазерного нагрева (таблица 1), кроме того, данный тип термической стимуляции также представляется перспективным для определения характеристик дефектов.

Таблица 1. Максимальное значение отношения сигнал/шум (SNR) и время его наблюдения (t) при лазерной термографии.

Defect	$SNR_m/t_{SNRm}$ , с (непрозрачный)	$SNR_m/t_{SNRm}$ , с (полупрозрачный)
D1	129.5/5.3	84.6/4.4
D2	70.3/14.1	43.3/12.3
D3	13.4/25.4	11.2/21.3

На рисунке 3 показаны термограммы, полученные при контроле непрозрачных и полупрозрачных образцов с использованием лазерного нагрева.

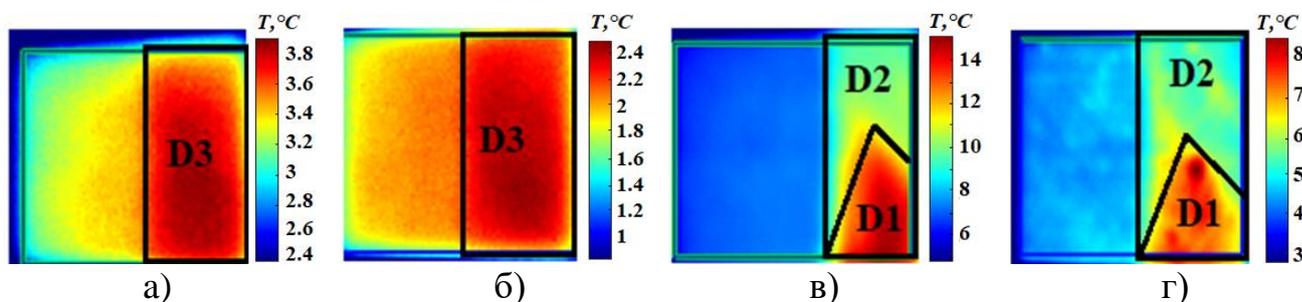


Рисунок 3 – ИК термограммы непрозрачного (а, в) и полупрозрачного (б, г) образцов через 5 (в, г) и 30 (а, б) секунд после лазерного нагрева

Традиционная оптическая стимуляция с использованием ксеноновых импульсных ламп, примененная к полупрозрачным материалам, не позволила определить параметры дефектов, в частности, глубину их залегания методами импульсно-фазовой термографии и реконструкции термографического сигнала. При этом использование метода TSR позволило увеличить величины SNR, в то время как импульсно-фазовая термография в ряде случаев привела к снижению SNR.

Результаты разработанного метода оценки глубины дефектов в полупрозрачных материалах, основанного на применении искусственных нейронных сетей и предварительной обработке термографических данных, приведены на рисунке 4 в виде карт глубин исследуемого объекта.

Бездефектные области на картах глубин характеризуются величинами, равными толщине образца. Ошибка определения глубины данным методом не

превысила 5%. Было установлено, что в качестве входных данных для НС наиболее эффективно использование последовательности значений первой производной в соответствующих пикселях.

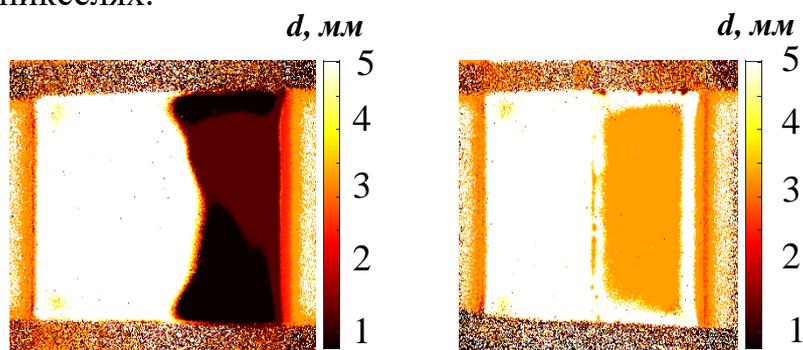


Рисунок 4 – Карты глубины дефектов, полученные с использованием НС

Особенностью описываемого метода является требование соответствия параметров температурных данных, на которых проводят обучения НС, параметрам данных, которые подают на вход НС для проведения дефектоскопии и дефектометрии. Речь идет о частоте записи термограмм и их количестве, а также мощности и длительности нагрева и ТФХ контролируемого материала. Следует отметить, что в проведенном исследовании обучение НС проводили на температурных данных той же последовательности, которую использовали для тестирования НС, однако для их сбора использовали другие области на поверхности объекта контроля.

**Глава 4** посвящена разработке метода оценки глубины залегания дефектов, учитывающего их конечный размер. Метод основан на сочетании известной упрощенной модели ТК и алгоритма нелинейной подгонки. Данный подход учитывает конечный поперечный размер дефектов и коэффициент теплового отражения на границах между основным материалом и дефектами, а также величины кажущейся тепловой инерции материала, определяемые экспериментально. Предлагаемая модель описана формулой (1):

$$\Delta\bar{T}(R, d, D, e_{app}, \alpha, t) = \frac{2}{e_{app}\sqrt{\pi t}} \left[ \sum_{n=1}^M R^n e^{-\frac{(nd)^2}{at}} \right] \left( 1 - e^{-\frac{D^2}{16mat}} \right), \quad (1)$$

где  $R$  - коэффициент теплового отражения,  $d$  - глубина дефекта,  $D$  - диаметр дефекта,  $e_{app}$  - кажущаяся тепловая инерция,  $\alpha$  - температуропроводность,  $t$  -

время,  $n$  – индекс суммирования и  $M$  – количество итераций. В данном исследовании было принято  $M = 10$ , поскольку более высокие члены суммирования вносили вклад, которым можно пренебречь.

Было установлено, что модель обеспечивает хорошую корреляцию численных и экспериментальных данных во временном диапазоне, соответствующем фронту нарастания температурного контраста  $0 < t < t_{peak}$ . Возможности дефектометрии данного метода были проанализированы на результатах численного моделирования и экспериментальных данных ТК образцов, изготовленных методом аддитивных технологий, которые содержали дефекты в виде отверстий с плоским дном, дисков и сфер трех различных диаметров, размещенных на различной глубине (см. рисунок 5).

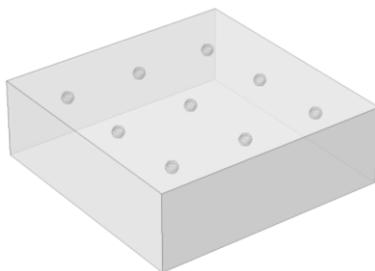


Рисунок 5 – Схема расположения сферических дефектов ( $D=3$  мм) в образце

Результаты численного моделирования продемонстрировали хорошее согласование между аналитической и численной моделями в заданном интервале времени, что обеспечило удовлетворительный результат дефектометрии с величиной ошибки до 6 %. На рисунке 6 показана средняя относительная ошибка оценки глубины залегания каждого типа дефекта, полученная методами TSR и нелинейной подгонки.

Максимальные относительные ошибки дефектометрии методом нелинейной подгонки не превысили 6% для дефектов в виде дисков и отверстий с плоским дном ( $D=1$  мм,  $d=0,2$  мм). Фактически, такие ошибки обусловлены конечной длительностью теплового импульса как фактора, который особенно важен для подповерхностных дефектов. По полученным данным можно заключить, что предложенный алгоритм учитывает поперечный размер дефектов и пригоден для дефектометрии мелких дефектов. Следует заметить, что относительная ошибка

дефектометрии при использовании метода TSR находится в диапазоне 10-22%, причем большие значения наблюдались для дефектов с низкой величиной соотношения сторон. Кроме того, было показано, что геометрическая форма дефекта характеризуется коэффициентом теплового отражения  $R$ , величина которого, например, в зависимости от глубины дефекта варьируется в диапазоне 0,3–0,6 для сфер и 0,7–1 для дисков и отверстий с плоским дном.

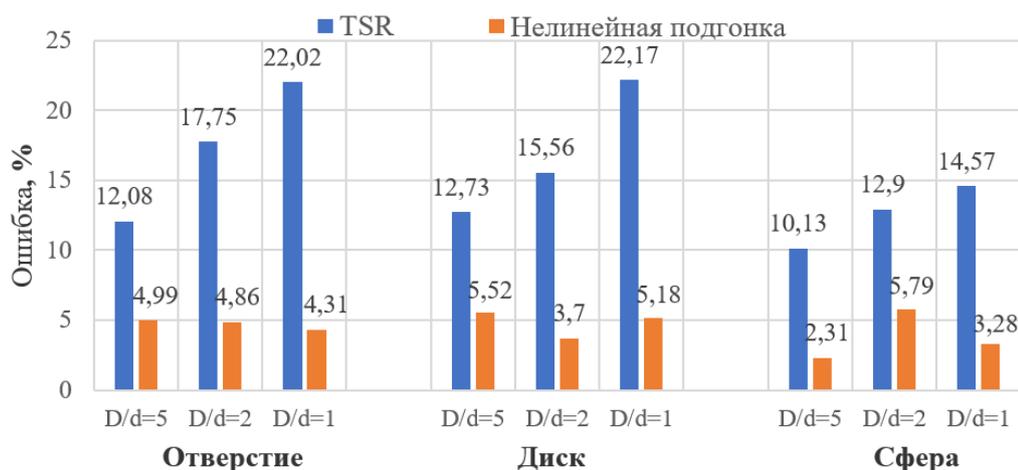


Рисунок 6 – Средние относительные ошибки оценки глубины залегания дефектов с использованием методов TSR и нелинейной подгонки к аналитической модели

На рисунке 7 показан результат нелинейной подгонки аналитической модели к экспериментальным данным ТК образца с дефектами в форме диска диаметром 1 мм, расположенными на различной глубине.

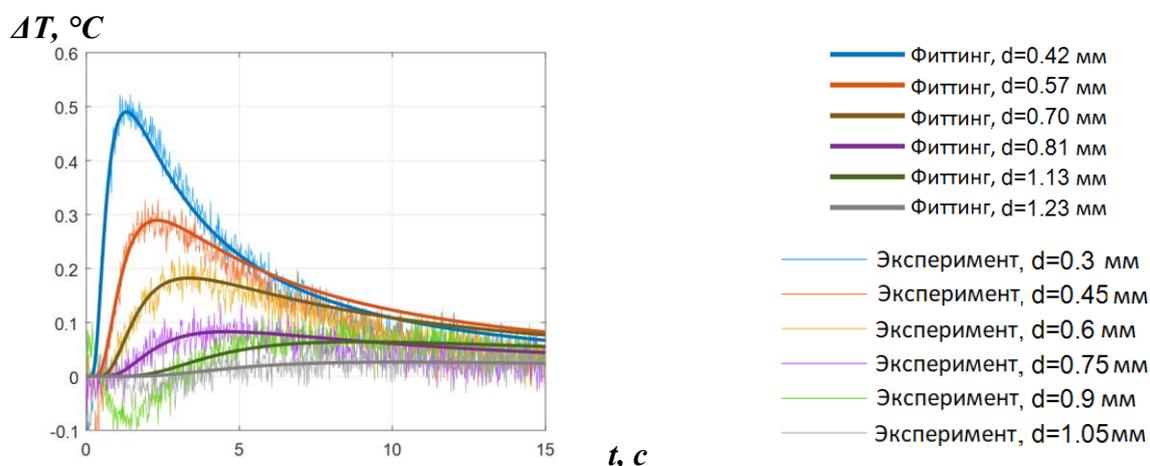


Рисунок 7 – Графики изменения температурного сигнала  $\Delta T$ , построенные по экспериментальным данным, а также аналитические кривые, полученные методом нелинейной подгонки

Из рисунка 7 видно удовлетворительное совпадение теоретической модели с экспериментальными данными, а полученные результаты дефектометрии оказались ближе к истинным параметрам дефектов, по сравнению с результатами применения алгоритма TSR. Таким образом, величина относительной ошибки определения глубины дефектов методом нелинейной подгонки не превысила 15% за исключением случая с дефектом в виде диска диаметром 1 мм, для которого ошибка составила 22%, что, вероятно, связано с определенным отклонением параметров реального изделия, изготовленного методом 3D печати, от модели. В случае алгоритма TSR ошибка дефектометрии варьировалась в диапазоне 22–46%, а полученные величины глубины дефектов получились ниже истинных, поскольку некоторые экспериментальные температурные кривые не имели отчетливых пиков производной. Например, расчетная глубина для отверстий с плоским дном ( $D=3$  мм) составила 1,65 мм для метода TSR и 2,4 мм для метода нелинейной подгонки.

**В пятой главе** описан предложенный метод определения толщины металлических покрытий, основанный на анализе кажущейся тепловой инерции и оптимального времени ее наблюдения. Оптимальным временем наблюдения являлся момент пересечения кривой кажущейся тепловой инерции заранее заданного порогового значения. Линейная зависимость между квадратным корнем оптимального времени наблюдения и толщиной покрытия была определена по результатам теоретического анализа. По сравнению с известными в ТК методами определения толщины покрытий, концепция порогового значения кажущейся тепловой инерции позволяет получить линейную зависимость толщины от искомого параметра, что позволяет создать универсальные модели ТК с большим диапазоном толщин покрытий.

Апробация метода была проведена на результатах численного моделирования и экспериментальных данных ТК образцов с покрытием из CrFe, нанесенным методом термического напыления, толщина которого варьировалась от 0,1 до 1 мм. Расчетные и экспериментальные графики тепловой инерции представлены на рисунке 8. Пунктирными линиями показаны величины кажущейся тепловой инерции для полубесконечных объектов из материалов покрытия и подложки,

величины которых были аналитического моделирования. Сплошными линиями показаны графики кажущейся тепловой инерции для образцов с покрытиями различной толщины.

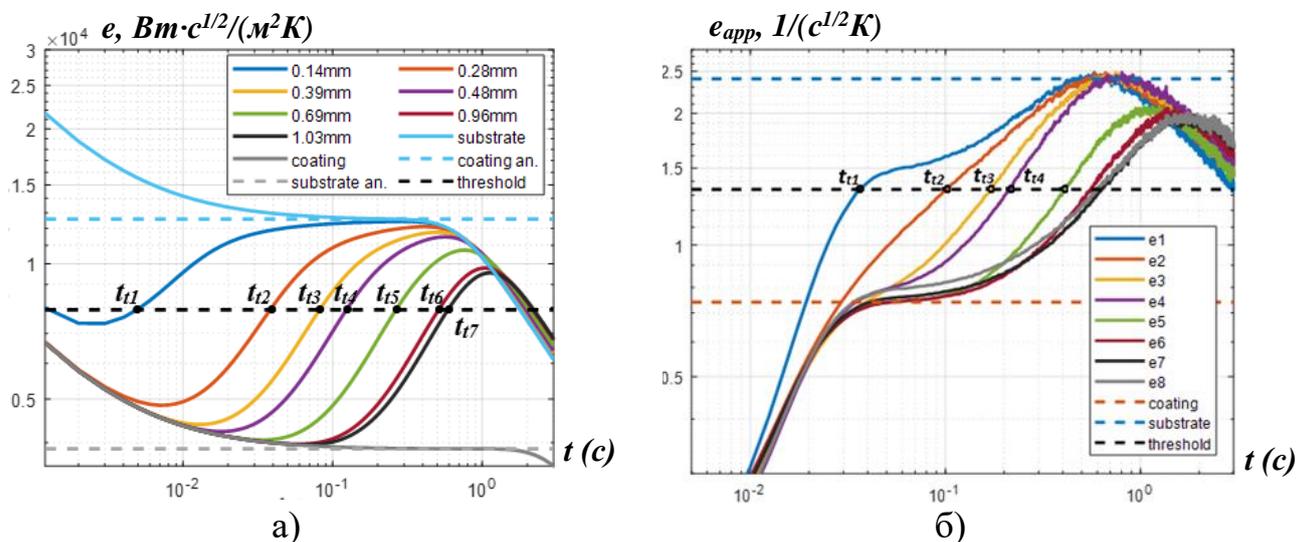


Рисунок 12 – Анализ толщины покрытия по изменению кажущейся тепловой инерции, проведенный по результатам моделирования (а) и экспериментальным данным (б)

Из приведенных графиков видно, что величины кажущейся тепловой инерции исследованных образцов сначала приближаются к величинам тепловой инерции покрытия, а затем снижаются до величин тепловой инерции подложки. Пороговая величина тепловой инерции для определения толщины покрытия была установлена между величинами кажущейся тепловой инерции подложки и покрытия, точки пересечения с которыми показывают линейную зависимость между толщиной покрытий и корнем квадратным из порогового времени.

Предложенный метод продемонстрировал приемлемые для практического применения результаты, которые были подтверждены микрометрическим измерением толщины покрытия, в результате которых был определен разброс измеряемой величины, находящийся в диапазоне 13 - 119 мкм при стандартном отклонении 40 мкм.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Проведен сравнительный анализ существующих методов неразрушающего контроля, применяемых для испытаний авиационных ПКМ. Показано, что

активный ТК является одним из перспективных методов НК для решения разнообразных задач испытаний.

- Проведено экспериментальное сравнение ИК термографических методов, направленных на количественную оценку глубины дефектов. Обозначены их основные ограничения и недостатки. Установлено, что большинство известных методов, основанных на одномерной модели теплопроводности и поверхностном нагреве, не могут быть использованы, например, для дефектометрии полупрозрачных материалов, в которых нагрев оптическими источниками осуществляется во всей толще материала, а не только на поверхности. Кроме того, установлена неэффективность таких методов дефектометрии в случае дефектов малого размера, когда на результаты влияет трехмерная диффузия тепла.

- Разработан метод количественной оценки глубины дефектов, основанный на использовании искусственных нейронных сетей. Следует отметить, что данный подход позволил определять глубину дефектов в полупрозрачном ПКМ. Разработанный метод включает описание выбора структуры НС, а также процедуры предварительной обработки данных. Уровень относительной погрешности дефектометрии с использованием НС оказался ниже, чем продемонстрировали известные термографические методы оценки глубины дефектов. Однако, использование НС требует достаточного количества данных для ее обучения, а также точного соответствия параметров входных данных, используемых для обучения и применения НС. Это предъявляет высокие требования к повторяемости процедуры ТК, небольшие изменения которых ведут к существенной погрешности результатов.

- Разработан метод определения глубины дефектов с учетом трехмерной диффузии тепла, позволяющий решить задачу определения глубины дефектов с малым соотношением поперечных размеров к глубине. Метод основан на приближении аналитической модели к экспериментальным данным путем нелинейной подгонки. Данный метод показал наименьшую величину ошибки дефектометрии по сравнению с методом реконструкции термографического

сигнала, который традиционно используется при анализе данных в задачах ТК с выраженной трехмерной диффузией тепла.

- Предложен метод определения толщины покрытий, основанный на использовании пороговых величин кажущейся тепловой инерции. Данный метод обеспечивает построение карт толщины покрытий и демонстрирует низкий для ТК уровень ошибки, сопоставимый с прямыми измерениями. Линейный характер зависимости толщины от квадратного корня порогового времени делает метод универсальным и предпочтительным в сравнении с другими термографическими методами оценки толщины покрытий.

#### **Основные результаты диссертации изложены в публикациях:**

1. **Moskovchenko A. I.**, Švantner M., Vavilov V. P., Chulkov A. O. Characterizing Depth of Defects with Low Size/Depth Aspect Ratio and Low Thermal Reflection by Using Pulsed IR Thermography //Materials. – 2021. – Т. 14. – №. 8. – С. 1886.
2. **Moskovchenko A.**, Vavilov V., Švantner M., Muzika L., Houdková Š. Active IR thermography evaluation of coating thickness by determining apparent thermal effusivity //Materials. – 2020. – Т. 13. – №. 18. – С. 4057.
3. **Moskovchenko A. I.**, Vavilov V. P., Bernegger R., Maierhofer C., Chulkov A. O. Detecting Delaminations in Semitransparent Glass Fiber Composite by Using Pulsed Infrared Thermography //Journal of Nondestructive Evaluation. – 2020. – Т. 39. – №. 3. – С. 1-10.
4. **Moskovchenko A. I.**, Vavilov V. P., Chulkov A. O. Comparing the efficiency of defect depth characterization algorithms in the inspection of CFRP by using one-sided pulsed thermal NDT //Infrared Physics & Technology. – 2020. – Т. 107. – С. 103289.
5. **Moskovchenko A. I.**, Chulkov A. O., Nesteruk D. A., Vavilov V. P., Saeed N., Omar M. Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating defect depth in infrared thermographic nondestructive testing //Infrared Physics & Technology. – 2019. – Т. 102. – С. 103047.
6. **Moskovchenko A. I.**, Vavilov V. P., Karabutov A. A., Chulkov A. O., Derusova D. A., Cherepetskaya E. B., Mironova E. A. Comparative study of active infrared thermography, ultrasonic laser vibrometry and laser ultrasonics in application to the

inspection of graphite/epoxy composite parts //Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2020. – Т. 17. – №. 4. – С. 235-248.

7. **Moskovchenko A. I.**, Chulkov A. O., Vavilov V. P. Active thermal testing of delaminations in heat-shielding structures //Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Т. 55. – №. 3. – С. 240-247.

8. **Moskovchenko A. I.**, Vavilov V., Chulkov A., Smotrov A., Smotrova S. Characterizing impact damage in GFRP/CFRP composites by determining thermal effusivity/diffusivity //Measurement Science and Technology. – 2019. – Т. 30. – №. 3. – С. 034003.

9. **Moskovchenko A. I.**, Simonov D. A. Portable device for thermal nondestructive testing of hidden corrosion in metallic shells by using a LED heat source //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 121. – С. 01014.

10. **Московченко А. И.**, Чулков А. О., Вавилов В. П. Активный тепловой контроль изделий из углепластика сложной формы с использованием различных способов нагрева //Контроль. Диагностика. – 2018. – №. 12. – С. 20-27.

11. **Moskovchenko A. I.**, Vavilov V. P., Pan Y., Čapka A. Modelling, detecting and evaluating water ingress in aviation honeycomb panels //Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2017. – Т. 14. – №. 2. – С. 206-217.

12. **Moskovchenko A. I.**, Chulkov A. O., Vavilov V. P., Pan Y. Y. Quantitative evaluation of water content in composite honeycomb structures by using one-sided IR thermography: Is there any promise? //Thermosense: Thermal Infrared Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – Т. 10214. – С. 102140U.

13. **Moskovchenko A. I.**, Simonova O. S., Kasianov S. V., Xingwang G. Analyzing the thermal regime of power supply units in portable betatrons by using infrared thermography //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 92. – С. 01017.

14. **Московченко А. И.**, Пань Я., Нестерук Д. А., Вавилов В. П. О возможности количественной оценки скрытой воды в авиационных сотовых панелях методом инфракрасной термографии //Контроль. Диагностика. – 2016. – №. 10. – С. 4-10.

15. **Moskovchenko, A. I.**, Švantner M., Muzika L., Houdková Š., & Frková P. Quantitative inspection of thickness of thermally sprayed coatings by flash pulse thermographic method // 15th Quantitative InfraRed Thermography Conference. – 2020. – Т. 042. – С.10.21611.