

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Чулков Арсений Олегович

Томск – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Глава 1. Обзор современного состояния и литературы в области количественной оценки и дефектометрии методом активного теплового контроля	12
1.1 Общее состояние и обзор методов неразрушающего контроля авиационных композитов	12
1.1.1 Визуальный контроль	13
1.1.2 Ультразвуковой контроль	14
1.1.3 Радиационный контроль	15
1.1.4 Оптические методы контроля	15
1.1.5 Применение терагерцового излучения	17
1.1.6 Инфракрасная термография	17
1.1.7 Сравнение методов НК авиационных композитов	18
1.2 Теоретические основы и аналитические модели, применяемые для количественной оценки глубины дефектов и толщины покрытий методами импульсной ИК термографии	20
1.2.1 Импульсно-фазовая термография	22
1.2.2 Метод кажущейся тепловой инерции	23
1.2.3 Метод раннего времени наблюдения	24
1.2.4 Метод реконструкции термографического сигнала	25
1.2.5 Метод тепловых квадрупольей	26
1.2.6 Нелинейная подгонка	28
1.2.7 Применение искусственных нейронных сетей	29
1.3 Выводы по Главе 1	30
Глава 2. Сравнение методов количественной оценки глубины дефектов в углепластике.	31
2.1 Численное моделирование	33
2.2 Экспериментальная установка и образцы	35
2.3 Результаты определения глубины на основе синтетических данных	37
2.4 Результаты определения глубины на основе экспериментальных данных	41
2.5 Выводы по Главе 2	50

Глава 3. Разработка метода оценки глубины дефектов в полупрозрачном стеклопластике при помощи искусственных нейронных сетей	52
3.1 Теоретические основы и аналитическая модель оптического ТК в полупрозрачном стеклопластике	52
3.2 Численное моделирование.....	55
3.3 Экспериментальная установка и образцы	57
3.4 Экспериментальные результаты ИК термографического контроля с применением импульсных ламп	60
3.5 Экспериментальные результаты ИК термографического контроля с применением лазерного нагрева	63
3.6 Определение глубины дефектов в полупрозрачных материалах с помощью нейронных сетей	65
3.7 Выводы по Главе 3	67
Глава 4. Разработка метода оценки глубины дефектов малых размеров при помощи нелинейной подгонки к аналитической модели	69
4.1 Теоретические основы и аналитическая модель для определения глубины дефектов малых размеров	70
4.2 Численное моделирование	73
4.3 Экспериментальная установка и образцы	76
4.4 Результаты численного моделирования	78
4.5 Экспериментальные результаты	82
4.6 Выводы по Главе 4	88
Глава 5. Разработка метода оценки толщины покрытий на основании пороговой отсечки кажущейся тепловой инерции	90
5.1 Теоретические основы метода	91
5.2 Полуаналитическая модели для верификации метода	93
5.3 Экспериментальная установка и образцы	94
5.4 Результаты моделирования	96
5.5 Экспериментальные результаты	98
5.6 Выводы по Главе 5	102
Общие выводы по диссертации	104
Перечень сокращений и обозначений	106

Термины и определения	107
Список используемых источников	108
Приложение А	114
Приложение Б	115
Приложение В	117
Приложение Г	118

ВВЕДЕНИЕ

Популярность инфракрасной (ИК) термографии как метода неразрушающего контроля (НК) материалов и изделий постоянно возрастает в течение последних десятилетий. Особенно широкое распространение данный метод приобретает в авиакосмической промышленности и при производстве композитных материалов [1–3]. Ряд преимуществ ИК термографии, такие как возможность контроля больших поверхностей за относительно короткое время, наглядность представления результатов испытаний и чувствительность к типичным для композитов дефектам, позволяют тепловому контролю успешно конкурировать с другими распространёнными методами неразрушающего контроля, а именно, ультразвуковым (УЗ) и радиационным [4]. Требования к контролю качества материалов и изделий в авиакосмической промышленности особенно высоки по ряду очевидных причин. При этом, зачастую, для НК применяют одновременно несколько методов испытаний. Инфракрасный термографический, или тепловой контроль (ТК) зарекомендовал себя как метод предварительного (скринингового) обследования, в то время как для количественной оценки параметров дефектов (дефектометрии) обычно применяют другие, более точные методы. Вместе с тем, современная аппаратура данного метода, а также возможности компьютерного анализа позволяют перейти к дефектометрии и количественной оценке в рамках ТК, что позволяет снизить общую стоимость и временные затраты на НК. Следует также заметить, что ИК термография зачастую не имеет альтернатив, так как позволяет контролировать труднодоступные зоны в сложных объектах и выявлять некоторые виды дефектов, представляющие трудности при выявлении другими методами. Например, диагностика наклонных панелей эксплуатируемых самолётов затруднительна для большинства видов НК, а подповерхностные дефекты с трудом обнаруживают при помощи УЗ дефектоскопов. Расслоения в композитах, не изменяющие общую «радиационную толщину» изделия, не могут быть выявлены радиационными методами.

Значимость процедур НК в авиакосмической промышленности в целом, а также эффективность и перспективность ИК термографии как метода НК, обусловили актуальность исследований в настоящей диссертационной работе. Акцент в исследованиях сделан на количественную оценку дефектов методом ИК термографии, т.е. дефектометрию. В первой главе проведён обзор общего состояния НК и дефектоскопии в авиационной промышленности, выполнено сравнение существующих методов теплового НК и дефектометрии. На основании этого выявлены пробелы между существующими в ТК подходами к тепловой дефектометрии, что

стимулирует необходимость их дальнейшего развития. Ниже сформулированы цели и задачи исследования. В главах 2-5 представлена методология и результаты исследований, направленных на решение задач тепловой дефектоскопии и дефектометрии. В заключении подведены итоги выполненных исследований, сделаны соответствующие выводы обсуждены возможности и перспективы дальнейших исследований в вышеуказанной области НК.

Актуальность темы 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 материалов и изделий требует разработки специальных подходов неразрушающих испытаний и вызывает трудности даже для традиционных методов НК. Кроме того, практическая оценка степени критичности выявленных дефектов предъявляет повышенные требования к задаче дефектометрии. Активный 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 дефектометрии актуальна с точки зрения повышения эффективности НК ответственных элементов авиационных конструкций на стадии их как изготовления, так и эксплуатации.

Степень разработанности темы

Систематические исследования по обнаружению дефектов в материалах методом ТК датируются концом 70-х годов прошлого века, в частности, Н. Непеке экспериментально продемонстрировал возможность обнаружения дефектов в анизотропных и изотропных материалах. 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 ТК проводятся во многих мировых научно-исследовательских лабораториях и университетах. Наиболее заметными являются группы

X. Maldaque в Университете Лавалья (Канада), J.-C. Batsale в Университете Бордо (Франция), В. Oswald-Tranta в Университете Леобен (Австрия), М. Omar в Университете Халифа (ОАЭ), J. Morikawa в Токийском институте технологий (Япония), С. 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 такие исследователи как С.А. Смотров 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) и др.

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. Яняна, О.С. Симоновой и более ранних исследователей. Ряд исследований, результаты которых приведены в настоящей работе, были выполнены в рамках научных стажировок соискателя в научных группах профессора С. Maierhofer в Институте исследования материалов (г. Берлин, Германия) и профессора М. 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 для оптического излучения нагрева ПКМ.
- Разработать метод количественной оценки толщины металлических покрытий, выполненных методом термического напыления.

Объект исследования - активный тепловой НК при импульсном оптическом, включая лазерный, видах нагрева.

Предмет исследования – алгоритмы обработки температурных данных и методики тепловой дефектометрии в рамках импульсного теплового контроля.

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 трёхмерная диффузия тепла существенно влияет на параметры ТК. Методика основана на нелинейной подгонке экспериментальных температурных кривых методом наименьших квадратов к упрощённой аналитической модели, учитывающей влияние трёхмерной 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 настоящей диссертационной работе использованы теоретические основы теплового неразрушающего контроля, построенные на фундаментальной теории теплопроводности для одномерных твёрдых тел, описанной А.В. Лыковым, Н. Carslow и J. Jaeger [5,6]. Аналитические методы решения одномерных задач теплопроводности в многослойном материале, а также численные методы решения трёхмерных задач теплопроводности в твёрдых телах 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 по сравнению 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 поглощённой 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 трёхмерной теплопроводности, может быть определена на базе упрощённой 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 была проведена при помощи трёхмерного численного моделирования процесса переноса тепла в твёрдых телах с использованием пакетов Comsol Multiphysics и программы ThermoCalc-3D (Томский политехнический университет). Достоверность экспериментальных данных обеспечена применением современной высокочувствительной тепловизионной 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. Автором 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, индексируемых 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 87 работ, содержит 118 страниц текста, 50 рисунков, 32 формулы, 12 таблиц и 4 приложения.

Глава 1. Обзор современного состояния и литературы в области количественной оценки и дефектометрии методом активного теплового контроля

1.1 Общее состояние и обзор методов неразрушающего контроля авиационных композитов

Авиакосмическая промышленность, являясь современной высокотехнологичной индустрией, предъявляет повышенные требования к качеству применяемых материалов и изделий, их контролю, надёжности и безопасной эксплуатации. Возможные последствия применения некачественных или дефектных материалов сопряжены не только с огромными финансовыми рисками, но и с угрозами жизни людей [7].

В современной авиакосмической технике все большая доля материалов приходится на композиты, благодаря отличному соотношению их прочности и массы. Углепластики и стеклопластики – наиболее широко используемые композитные материалы во многих высокотехнологичных отраслях, таких как авиация, атомная энергетика, автомобилестроение, строительство и др. Угле и стеклопластик представляет собой композитный материал, состоящий из полимерной матрицы армированной волокнами, формируемыми из углерода и стекла [8]. В зависимости от вида волокон и их ориентацией существует большое разнообразие подобных ПКМ.

Скрытые дефекты, которые неизбежно появляются в материалах на стадии производства и эксплуатации, могут серьёзно повлиять на прочность и другие свойства материала, что ставит под угрозу надёжность их эксплуатации и уменьшает срок службы. Поэтому своевременное обнаружение структурных неоднородностей в ПКМ является неотъемлемой частью их производства и эксплуатации.

Традиционные методы неразрушающего контроля позволяют обнаружить дефекты в плоских изделиях, многослойных и сотовых конструкциях. Однако обнаружение дефектов в деталях сложной формы, характеризующихся кривизной поверхности, наличием крепёжных и клеевых соединений является более сложной задачей. Конструкции из ПКМ для аэрокосмической отрасли в настоящее время производятся с использованием автоматизированных процессов такого масштаба и сложности, которые не были доступны при разработке большинства традиционных методов НК, используемых по сей день и описанных в нормативной литературе.

Таким образом, разработка новых методов НК и усовершенствование существующих подходов является важной задачей для авиакосмической промышленности и контроля качества материалов.

НК решает задачу не только контроля дефектов во время производства и эксплуатации, но и задачу анализа свойств материала, которое может проявиться во время эксплуатации. Количественный НК можно рассматривать как инструмент для прогнозирования срока службы и надёжности изделий из ПКМ в процессе эксплуатации авиакосмической техники. Некоторые виды дефектов, классифицированных как серьёзные, перед ремонтом подлежат количественной оценке дефекта, т.е. дефектометрии. Например, наличие информации о глубине залегания/распространения дефекта позволяет в процессе ремонта качественно провести инъекцию клея или снятия достаточного количества слоёв композита перед наложением заплат [9]. Также одним из частных случаев применения дефектометрии является определение толщины покрытий и плёнок. Основной принцип большинства методов НК заключается в том, что дефект изменяет амплитуду, частоту, фазовый угол входящего волнового сигнала путём отражения, преломления и поглощения. Волнообразным сигналом, используемый в неразрушающем контроле, может быть оптический свет, рентгеновские лучи, упругие и ультразвуковые волны, переменное электрическое и магнитное поле, тепловые волны.

Среди разнообразия существующих методов НК визуальный контроль, рентгенография, ультразвук, лазерная широгграфия, инфракрасная термография и компьютерная томография в настоящее время являются основными для испытаний изделий из ПКМ [4, 9] и будут рассмотрены ниже.

1.1.1 Визуальный контроль

Метод визуального контроля основан на обнаружении дефектов на поверхности изделий. Поскольку визуальный метод не требует специального оборудования и является относительно быстрым, это первый метод контроля, используемый на этапе производства, а также при заключительном контроле качества. Однако данный вид испытаний включает только поверхностный осмотр и не способен выявить дефекты внутренней структуры, такие как расслоения, пустоты или подповерхностные дефекты покрытия. Следует отметить, что несмотря на достаточную простоту метода дефектоскопист должен обладать достаточным опытом и знаниями для распознавания определённых типов поверхностных дефектов.

1.1.2 Ультразвуковой контроль

Ультразвуковой контроль наиболее широко используемый метод НК при исследованиях композитов. Данный вид испытаний позволяет достичь высокого разрешения в зависимости от выбранной частоты (от 100 кГц до 40 МГц). Метод основан на передаче короткого импульса высокочастотных волн, которые, проходя через материал и встречая дефект или границу между различными средами, отражаясь попадают обратно в передатчик, который, в свою очередь, преобразует её в электрический сигнал, и представляет его оператору для интерпретации. Этот метод считается объёмным, поскольку он позволяет определить длину, местоположение и тип дефекта. УЗ метод наиболее чувствителен к дефектам, которые лежат перпендикулярно фронту распространения звуковой волны, однако одним из важных преимуществ этого метода является то, что можно использовать различные углы луча и датчики для обнаружения более критических плоских неоднородностей, таких как трещины, расслоения, неполные сплавления и т. д. и при которых другие методы НК не обеспечивают требуемых результатов. Кроме того, к преимуществам УЗ метода можно отнести портативность оборудования, возможность автоматизации процедуры испытаний и возможность НК с доступом к контролируемому изделию с одной стороны.

Перед проведением контроля УЗ методом необходима калибровка при помощи стандартных образцов, а поверхность для испытаний должна быть специально подготовленной. Следует отметить, что для УЗ контроля требуется использование иммерсионной жидкости, обеспечивающей передачу ультразвуковых волн преобразователя в объект контроля. Результат ультразвукового контроля может быть интерпретирован различными способами: А-сканирование, В-сканирование, С-сканирование. Современные компьютеризированные системы ультразвукового сканирования могут отображать данные одновременно во всех трёх формах представления. А-сканирование отображает на плоскости X-Y количество полученной ультразвуковой энергии как функцию времени. В-сканирование - это профиль (поперечный срез) исследуемого образца. С-сканирование представляет собой вид в проекции расположения и размера характеристик исследуемого образца.

Ультразвуковой контроль эффективен при испытаниях металлических материалов и может быть использован для обнаружения большинства видов внутренних дефектов [10], однако результаты контроля зависят от пространственного разрешения, обуславливаемое используемой аппаратурой [11]. Ввиду специфичности структуры ПКМ использование УК метода, в ряде

случаев, не обеспечивает желаемой эффективности, например, по причине низкого контраста между сигналами от дефекта и бездефектной структуры [12]. Еще более актуальной является проблема УЗ контроля дефектов малых размеров в полимерных композитах.

1.1.3 Радиационный контроль

Радиационный контроль (РК) подразумевает использования высокоэнергетического (коротковолнового) электромагнитного излучения, проходящего через материал. Материалы с областями меньшей толщины или меньшей плотности пропускают больше и, следовательно, поглощают меньше излучения. Излучение, достигающее плёнки или детектора после прохождения через материал, формирует теневое изображение. Данный вид НК позволяет проводить контроль материалов в объеме, обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты. Однако у него есть существенные ограничения. Основное ограничение связано с радиационной опасностью. Кроме того, оборудование для РК часто не портативное, что делает данный вид контроля относительно трудоёмким и дорогим, а результаты требуют интерпретации опытным специалистом. Радиационный метод НК ограничен в применении для деталей сложной конфигурации, и имеет трудности в обнаружении тонких расслоений и трещин [10]. Хотя современные системы с использованием синхротронов или нейтронных источников предлагают сверхвысокое разрешение и позволяют обнаруживать мельчайшие дефекты [13], помимо общих недостатков радиационных методов, доступность такого оборудования ограничена, а стоимость весьма высока.

Также для НК композитов применяется рентгеновская компьютерная томография – метод, который позволяет восстанавливать послойные изображения поперечных сечений объекта (томограммы) при помощи измерения и сложной компьютерной обработки разности ослабления рентгеновского излучения измеренных под разными углами ориентации объекта и источника/детектора.

1.1.4 Оптические методы контроля

В качестве источника стимуляции объекта контроля в оптических методах используют световое излучение. Основная идея состоит в том, что поверхностные трещины, царапины, пустоты или неровности изменяют исходные характеристики светового излучения. Дефекты

обнаруживают с помощью ПЗС (приборов с зарядовой связью) камер или оптических радиометров для захвата изображения проходящего или отражённого света. При наличии дефектов интенсивность проходящего или отражённого света изменяется в определённой степени. Как пространственное, так и временное разрешение оптических методов является достаточно высоким. С использованием оптических микроскопов пространственное разрешение может достигать 0,2 мкм [14]. Оптический контроль позволяет обнаруживать только поверхностные дефекты, или дефекты в прозрачных материалах. Однако существуют разновидности оптических методов, такие как интерферометрия и голография, позволяющие обнаруживать внутренние дефекты в материалах за счёт приложения к объекту оптических или механических нагрузок и измерения перемещений точек на поверхности объекта контроля.

Ширография или сдвиговая спекл-интерферометрия — это разновидность лазерной интерферометрии, регистрирующей производную от компонент вектора перемещений. Подповерхностные дефекты под воздействием нагрузки (обычно при нагревании, вибрации или механическом воздействии) изменяют геометрию поверхности материала. Это изменение на поверхности может составлять несколько микрометров [15]. В оборудовании используют лазер для создания спекл-рисунка, эквивалентного большому количеству равномерно распределенных мелких черных точек на белом фоне. При тепловом или вибрационном возбуждении зоны контроля камера регистрирует расположение точек, в результате чего можно определить какие точки перемещаются. Такое локальное перемещение точек может указывать на наличие дефекта. Большинство коммерческих систем ширографии основаны на использовании вакуумирования для нагрузки объектов контроля. Однако, ширография не является широко используемым методом НК. Одной из причин является тот факт, что использование вакуума затруднено в производственных условиях, особенно, на изогнутых конструкциях. Также существуют системы ширографии с динамическим тепловым нагружением объекта контроля. Такие системы трудно использовать из-за ограниченного разрешения и сложной интерпретации результатов.

Метод голографии позволяет зарегистрировать движение точек на поверхности объекта контроля с высокой чувствительностью. Метод, подобно ширографии, позволяет измерить смещение (статические и динамические) точек поверхности относительно положения оптической головки. Системы ширографии также измеряют статические и динамические смещения с высокой чувствительностью, но они измеряют пространственную производную смещения поверхности, что означает, что смещение всех точек поверхности измеряется относительно соседней точки [16]. Это означает, что сдвиговые перемещения поверхности объекта не могут быть обнаружены

методом широкографии. Поэтому широкография является менее информативным методом по сравнению с методом голографии, однако, в ряде случаев, может быть успешно использована для НК. Следует отметить, что метод голографии менее чувствителен к воздействиям окружающей среды и не требует стабильных условий по сравнению с методом лазерной широкографией.

1.1.5 Применение терагерцового излучения

Электромагнитное излучение в терагерцовом диапазоне (100 ГГц - 30 ТГц [17]) относится к неионизирующему излучению, безопасному для биологических тканей. С развитием источников и приемников терагерцового излучения, методы НК, основанные на данном принципе, стали перспективным инструментом для контроля композитов. Основным преимуществом использования излучения в ТГц диапазоне является более высокое пространственное разрешение и лучшая проникающая способность для большинства неметаллических материалов, по сравнению с другими методами НК [18].

Принцип терагерцового метода контроля основан на индуцировании коротких импульсов излучения в терагерцовом диапазоне, которые, взаимодействуя с различными структурами, включениями и дефектами, имеют различный уровень затухания. Особенности внутренней структуры материала определяют путём анализа интенсивности отражённого или прошедшего излучения. В связи с этим, терагерцовый вид контроля хорошо подходит для неразрушающих испытаний многослойных неэлектропроводных композиционных материалов и позволяет получить полную картину внутренних неоднородностей и повреждений исследуемого материала.

1.1.6 Инфракрасная термография

Метод ИК термографии основан на анализе нестационарных тепловых полей объекта контроля, записанных при помощи тепловизоров. Метод ИК термографии подразделяют на два вида: пассивный и активный. При пассивном методе контроля анализируют собственный температурный градиент объекта контроля, который подлежит анализу, например, работающее электрооборудование, тепловые установки, человеческое тело и т.п. Для НК полимерных композиционных материалов представляет интерес активный метод ИК термографии, подразумевающий использование внешнего возбуждения контролируемого объекта при одновременной регистрации теплового отклика на поверхности объекта контроля. Такое внешнее

тепловое нагружение провоцирует появление температурной неоднородности в зонах со структурными дефектами. Для теплового возбуждения используют галогенные или ксеноновые лампы, ИК нагреватели, горячий воздух, а также ультразвуковую стимуляцию и индукционный нагрев [19]. Оптические нагреватели являются наиболее универсальным и удобным источником нагрева, в то время как УЗ стимуляцию применяют для обнаружения узких трещин или, так называемых, «слипнутых» дефектов [20,21].

По форме волны теплового возбуждения активную термографию можно классифицировать на импульсную, волновую (lock-in), а также термографию с различными функциями нагрева (импульс с профилем квадрата, треугольника и т.д.). При импульсной ИК термографии объект нагревается коротким импульсом, который в приближении можно считать функцией Дирака. Волновая термография характеризуется периодическим нагревом, с последующим анализом данных в частотной области. При этом, анализ может быть построен как на сравнении фаз и амплитуд температурного отклика с входящим электрическим сигналом, так и на разности фаз между дефектными и бездефектными областями (без синхронизации источника нагрева и тепловизора) [22, 23]. Кроме того, функция нагрева может быть представлена в виде прямоугольного импульса длительностью 5-10 секунд, экспоненциальной функции, одиночного синусоидального импульса и т.д.

Поскольку результаты обнаружения дефектов зависят от плотности мощности поглощённой энергии, импульсный нагрев представляется наиболее эффективным, однако максимальную мощность применяемого нагрева ограничивают температурой разрушения материала [24]. В связи с этим, на практике, с целью снижения рисков разрушения материалов ввиду интенсивности теплового воздействия, а также благодаря более широкому распространению оборудования, волновой нагрев и нагрев длинным импульсом представляют наибольший интерес. Однако, с точки зрения количественной оценки и, в частности, оценки глубины дефектов предпочтительнее импульсный нагрев.

1.1.7 Сравнение методов НК авиационных композитов

Сравнение различных методов неразрушающего контроля в общем, а также применительно к ПКМ, проведено во многих работах [10,13,25,26]. Выводы всех исследователей сводятся к тому, что каждый из представленных методов имеет свои преимущества и недостатки и для различных

целей предпочтительно использование различных методов. Сравнительный анализ методов, применяемых для НК авиационных композитов представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Сравнение методов контроля авиационных композитов

Метод	Преимущества	Недостатки	Типы обнаруживаемых дефектов	Возможность количественной оценки дефектов
Визуальный осмотр [14, 27]	Простота, скорость, низкая цена.	Низкая надёжность и репродуктивность, субъективность, не обнаруживает подповерхностные и мелкие дефекты.	Поверхностные дефекты и трещины.	Поперечные размеры поверхностных дефектов.
Ультразвуковой контроль [11]	Разработанная теоретическая и нормативная база. Односторонний доступ. Безопасность, относительная простота и продуктивность [28].	Контактность и дискретность измерений. Зависит от опыта оператора и используемых алгоритмов. Сложность сетатов для некоторых типов дефектов и материалов. Высокое затухание сигнала в композитах, сложность обнаружения дефектов близких к излучателю [29].	Трещины, расслоения, пустоты.	Позволяет оценивать расположение и размеры дефектов [28,30].
Радиационные методы контроля [31]	Разработанная теоретическая и нормативная база. Высокое разрешение. Высокая эффективность и продуктивность. Бесконтактность.	Необходимость двухстороннего доступа. Громоздкое и дорогое оборудование. Опасное излучение и необходимость защиты.	Хорошо выявляются внутренние пустоты и широкие трещины. Для обнаружения расслоений требуются продвинутое методы и оборудование [32].	Поперечные размеры дефекта (радиография) Размеры, расположение и 3D визуализация при томографии.
Оптические методы, широкография, голография [15, 16]	Возможность бесконтактного контроля. Высокая производительность. Односторонний доступ.	Точность и качество контроля зависит от многих факторов. Дорогостоящее оборудование. Сложность обнаружения малых дефектов.	Трещины, расслоения, пустоты.	Поперечные размеры и глубина дефектов[33].
Терагерцовое излучение [34]	Высокая точность, чувствительность и повторяемость. Высокая	Низкая скорость, высокая стоимость. Неприменимость к	Трещины, расслоения, пустоты	Поперечные размеры, глубина и

	проникающая способность в композитах. Односторонний доступ.	металлическим материалам. Двухсторонний доступ.		толщина дефектов [35].
ИК термография [19]	Высокая производительность и низкая стоимость. Иллюстративность. Бесконтактность. Односторонний доступ. Возможность контроля труднодоступных конструкций и деталей сложной формы.	Отсутствие нормативов. Вариации ТФХ и оптических свойств материала могут ухудшать результаты. Времезатратная обработка данных. Глубина и размер выявляемых дефектов ограничены.	Трещины расслоения, пустоты.	Поперечные размеры, глубина, тепловое сопротивление дефектов [3, 36].

УЗ и РК методы являются традиционными методы и имеют существенную теоретическую и нормативную базы, а такие методы как ИК термография, широгграфия и терагерцовый контроль, менее изучены, хотя имеют высокий потенциал для развития.

Метод ИК термографии выглядит перспективным для контроля авиационных композитов как в процессе их производства, так и при эксплуатации. Основными преимуществами метода ИК термографии является высокая производительность контроля, относительно низкая стоимость оборудования и испытаний, чувствительность к типичным для композитов дефектам, «гибкость» в применении на производственных линиях и при полевых испытаниях. Недостатки метода сводятся к ограничению максимальной глубины и минимальных размеров дефектов, а также сложностью количественной оценки. Вышеописанные факты побудили автора провести настоящее исследование, направленное на усовершенствование методов количественной ИК термографии и преодоление существующих ограничений данного метода.

1.2 Теоретические основы и аналитические модели, применяемые для количественной оценки глубины дефектов и толщины покрытий методами импульсной ИК термографии

Импульсная термография основана на нагреве контролируемой поверхности коротким тепловым импульсом и одновременном наблюдении за изменением температуры на стадиях нагрева и охлаждения. Температура бездефектной области близка к аналитическому решению для полубесконечного тела после импульса Дирака [7]:

$$T(0, t) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi \rho C k t}} = \frac{Q_0}{e_m \sqrt{\pi t}} \quad (1.1)$$

где $T(0, t)$ - температура на поверхности ($x = 0$) в момент времени t после теплового импульса Дирака с энергетической интенсивностью Q_0 . ρ , C , k и e_m - плотность, удельная теплоёмкость, теплопроводность и тепловая инерция ($e_m = \sqrt{\rho C k}$) материала соответственно. Основной принцип ТК заключается в том, что подповерхностные дефекты нарушают регулярный поток тепла в испытуемом теле и вызывают появление сигналов $\Delta T(\tau)$, которые зависят от параметров нагрева $Q(\tau)$, а также от характеристик дефекта, геометрических характеристик и тепловых свойств материала. Неприятная особенность состоит в том, что $\Delta T(\tau)$ линейно пропорциональна $Q(\tau)$; это делает измерение амплитуды температуры на поверхности объекта контроля ненадёжным. Поэтому в ТК часто имеют дело либо с некоторыми типами контраста, такими как $C(\tau) = \Delta T(\tau)/T(\tau)$, либо анализируют временные характеристики изменения температуры. Например, в логарифмическом представлении уравнения (1.1) график зависимости температуры от времени представляет собой прямую линию с наклоном $-1/2$, и любое отклонение от этой линии может быть связано со скрытыми дефектами. Однако реальные процедуры ТК характеризуются большим количеством помех и шумов, а полезность простых аналитических подходов ограничена. Таким образом, можно сформулировать следующие условия выявляемости дефекта [24]:

- дефект должен производить отношение сигнал/шум больше 1;
- температура образца при испытании не должна превышать температуру разрушения материала;
- скорость записи изображений должна быть достаточно высокой, чтобы сохранить разумное количество кадров до оптимального времени наблюдения (время максимального температурного сигнала ΔT_{max}).

Тепловой шум складывается из аддитивного (шум ИК-детектора, окружающего излучения) и мультипликативного (структурного), вызванного неоднородностью коэффициента поглощения поверхности и тепловых свойств материала. Таким образом, сигнал от дефекта должен превышать сигналы, вызванные различиями коэффициента поглощения поверхности, структуры материала и окружающего излучения. Одновременно влияние аддитивного шума может уменьшить с помощью некоторых методов обработки данных, таких как фильтрация или подгонка. Однако, современные методы обработки данных позволяют выявлять даже сигналы, не превышающие уровень шумов.

Количественные методы в ТК можно подразделить на методы количественной оценки выявляемости дефектов, такие как отношение сигнал/шум [37], температурный и относительный контраст [38] и вероятность обнаружения [39], а также на методы оценки параметров дефектов (размеров, глубины, ТФХ) [40,41]. Одним из направлений данного исследования является разработка и совершенствование количественных методов оценки глубины дефектов в ПКМ. Далее проведён обзор существующих термографических методов оценки глубины дефектов.

1.2.1 Импульсно-фазовая термография

Метод импульсно-фазовой термографии (РРТ), предложенный X. Maldague и D. Marinetti, объединяет преимущества импульсной и волновой термографии [42]. Любой тип функции тепловой стимуляции, включая короткий импульс или вспышку, может быть представлен как сумма гармонических колебаний. Каждая волна характеризуется амплитудой, частотой ω , длиной тепловой диффузии μ и скоростью v :

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}; v = \sqrt{2\omega\alpha} \quad (1.2)$$

Высокочастотные тепловые волны распространяются быстрее, но на меньшие расстояния. Для обнаружения дефекта на определённой глубине длина тепловой диффузии должна быть сопоставима с глубиной дефекта. Другими словами, более глубокие дефекты следует обнаруживать с помощью более медленных тепловых волн. Изменяя частоту, можно определить так называемую «слепую» частоту f_b , связанную с глубиной дефекта l . Формула характеристики дефекта была предложена в следующем виде [43]:

$$l = A\mu = A\sqrt{(\alpha/\pi f_b)}, \quad (1.3)$$

где A – коэффициент пропорциональности, изменяющийся от 1,5 до 2 (в случае углепластика $A = 1,73$ [43]).

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) выполняет переход из временной области в частотную, где обычно анализируются фазовые изображения. Слепую частоту можно определить как частоту, при которой фазовый контраст $\Delta\Phi$ между дефектной и бездефектной областью

стремится к нулю. На практике обычно выбирается определённый фазовый порог, применяемый к $\Delta\Phi/\Phi_{nd}$ ($\Delta\Phi/\Phi_{nd} = 2\%$ в данном исследовании). Поскольку при зашумлённых экспериментальных данных слепая частота не всегда может быть чётко определена, она может определяться как максимальная частота, на которой отношение сигнал/шум превышает определённый порог.

1.2.2 Метод кажущейся тепловой инерции

В идеальном случае (если объект контроля можно представить как полубесконечное адиабатическое тело) экспериментальные значения тепловой инерции e , определяемые из формулы (1.1) в нескольких временных точках, должны представлять собой горизонтальную линию. D. Valageas и др. предложили оценивать кажущуюся тепловую инерцию в отдельных точках (пикселях) в качестве важного параметра, указывающего на наличие подповерхностных дефектов, которые нарушают эволюцию тепловой инерции [44]. В реальных телах возможно исследовать функцию $e(i, j)/e_{nd}$, где нижний индекс «nd» указывает область без дефектов. Эта функция близка к прямой, отклонения которой соответствуют подповерхностным дефектам. Например, терморезистивные дефекты вызывают уменьшение видимых значений $e(t)$ (рисунок 1.1).

Глубину дефекта можно определить по формуле:

$$l = \sqrt{\alpha t_{min}} (e/e_{nd})_{min}^{0.95}, \quad (1.4)$$

где t_{min} - время, когда отношение e/e_{nd} достигает минимального значения.

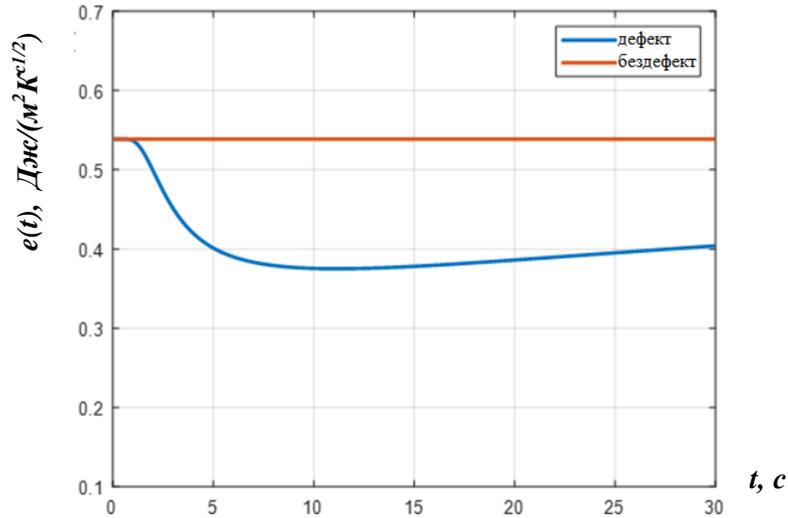


Рисунок 1.1 - Пример изображения графика тепловой инерции.

Концепция характеристики дефекта путём определения тепловой инерции материала была углублена Sun J. для применения в тепловой томографии [45]. Тепловая инерция как функция времени может быть найдена из уравнения (1.1):

$$e(z, t) = \frac{Q}{T(\tau)\sqrt{\pi t}}, \quad (1.5)$$

где координата z может быть определена $\sqrt{\pi at}$. Поскольку экспериментальную величину поглощённой энергии Q найти затруднительно, с учётом равномерного нагрева, была введена концепция кажущейся тепловой инерции:

$$e_{app}(t) = \frac{e(t)}{Q} = \frac{1}{T(t)\sqrt{\pi t}} \quad (1.6)$$

1.2.3 Метод раннего времени наблюдения

Как правило, в процедуре одностороннего ТК температурный сигнал $\Delta T(t)$ над подповерхностным дефектом начинается с нуля, затем достигает экстремального (максимального или минимального) значения и, наконец, спадает до нуля. Также температурный отклик и форма видимой индикации дефекта с течением времени искажается под действием поперечной

диффузии тепла. Другими словами, признаки поверхностных дефектов лучше воспроизводят форму и размер дефекта в более ранние сроки наблюдения. Соответствующий метод определения характеристик дефекта, предложенный Kgrpez и Balageas, требует оценки параметров дефекта в тот момент, когда сигнал $\Delta T(t)$ только начинает превышать уровень шума [46]. Формула определения глубины:

$$l = \sqrt{\alpha \tau_{min}(C_{run}) \ln(2/C_{run})}, \quad (1.7)$$

где $t_{min}(C_{run})$ время когда текущий контраст $C_{run} = \Delta T/Tnd$ достигает определённого порога от 1 до 10%. Данная формула была уточнена для значений контраста в 1% и 5% [47,48]:

$$l = \sqrt{\alpha t_{1\%}}/0.5655 \text{ and } l = \sqrt{\alpha t_{5\%}}/0.7291, \quad (1.8)$$

где $t_{1\%}$ и $t_{5\%}$ времена, когда ΔT превышает уровень шума на 1 и 5% соответственно.

1.2.4 Метод реконструкции термографического сигнала

Анализ производных температуры основная идея метода термографической обработки сигнала. Метод основан на обработке логарифмических температурных производных $d(\ln(T))/d(\ln(\tau))$ и $d^2(\ln(T))/d(\ln(\tau))^2$ во временной области [2, 49]. Первая производная температуры в процессе охлаждения полубесконечного тела после импульсного нагрева начинается со значения $-1/2$ и стремится к нулю, когда температура тела приближается к температуре окружающей среды. В одностороннем тесте тепловая энергия накапливается над теплоизолирующим дефектом, что приводит к изменению поведения производной и, когда возмущение от дефекта исчезает, производная возвращается к бездефектному уровню. Формула инверсии аналогична формуле (1.8):

$$l = \sqrt{\pi \alpha \tau_w}, \quad (1.9)$$

где τ_w время максимума второй логарифмической производной (рисунок 1.2).

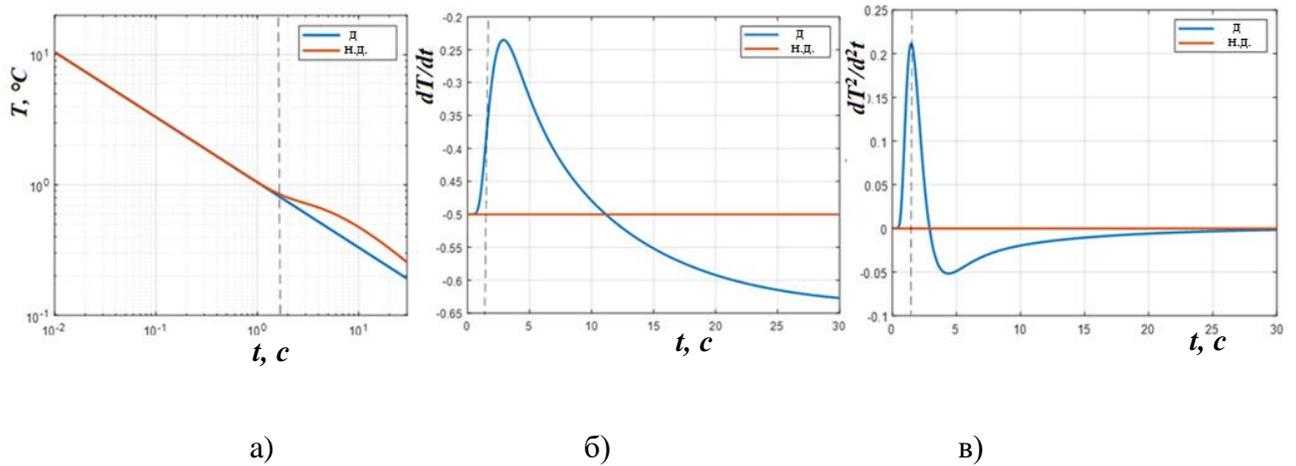


Рисунок 1.2 - Изменения температуры после импульсного нагрева (а), первая (б) и вторая (в) производные

Важной особенностью метода является то, что зашумлённые величины температуры следует сглаживать перед взятием производных, в противном случае шум может значительно повлиять на результаты вычислений. Для этого обычно применяется метод полиномиальной аппроксимации.

1.2.5 Метод тепловых квадруполей

Преобразование Лапласа распространённый инструмент для решения дифференциальных уравнений. Во многих практических случаях дифференциальные уравнения могут быть решены в явном виде в пространстве Лапласа. В 1921 г. Carslaw предложил заменить уравнение теплопроводности вместе с начальными и граничными условиями линейными матричными уравнениями, что позволило эффективно анализировать многослойные структуры [50]. Используя современные компьютеры, соответствующие расчёты могут быть выполнены как в пространстве Лапласа, так и в области истинных температур. Техника тепловых квадруполей и её использование в ТК была подробно описана Mailliet и др. в [51].

Для одномерной двухслойной пластины с терморезистивным дефектом между слоями матричное квадруполюное уравнение имеет следующий вид [52]:

$$\begin{bmatrix} \theta_f \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & A_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & A_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_r \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1.10)$$

где $A_j = \cosh(l_j \sqrt{p/\alpha_j})$; $B_j = 1/(k_j \sqrt{p/\alpha_j}) \sinh(l_j \sqrt{p/\alpha_j})$; $C_j = k_j \sqrt{p/\alpha_j} \sinh(l_j \sqrt{p/\alpha_j})$; $j=1$ и 2 для первого и второго слоя материала, θ_f, θ_r - Лапласовские температуры на передней поверхности, Q - поглощённая энергия, R_d - тепловое сопротивление дефекта, l_i - толщина i -го слоя, p - переменная Лапласа.

Решая уравнение (1.10), можно получить дифференциальный температурный сигнал в пространстве Лапласа $\Delta\theta$ (Лапласовский аналог ΔT) на передней поверхности [52]:

$$\Delta\theta_f = \frac{QR_d \sinh^2(l_2 \sqrt{p/\alpha})}{\sinh(L \sqrt{p/\alpha}) \cdot (\sinh((L \sqrt{p/\alpha}) + k \sqrt{p/\alpha} \cdot R_d \sinh(l_1 \sqrt{p/\alpha}) \sinh(l_2 \sqrt{p/\alpha}))}, \quad (1.11)$$

где L - толщина образца. Дискретное преобразование Лапласа может быть применено к температурному сигналу в безразмерной форме:

$$m(p^*) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \Delta T(\tau_i^*) \exp(-p^* \tau_i^*) \Delta \tau^* \quad (1.12)$$

с безразмерными параметрами: $\tau^* = \alpha \tau / l^2$; $p^* = l^2 p / \alpha$.

Уравнение (1.12) позволяет определить величину m для различных значений переменной Лапласа p^* . Путём алгебраического решения соответствующих уравнений в пространстве Лапласа была предложена следующая формула определения глубины [53]:

$$z = 1 - \frac{1}{\sqrt{p_1^*}} \ln \left[\left(\frac{m_2}{m_1} \right)^{1/2} \cosh(\sqrt{p_1^*}) + \left(\frac{m_2}{m_1} \cosh^2(\sqrt{p_1^*}) - 1 \right)^{1/2} \right], \quad (1.13)$$

где m_1 и m_2 значение преобразования Лапласа для p_1^* and p_2^* ($p_2^* = 4p_1^*$), $z = l_1/L$.

Рисунок 1.3 иллюстрирует алгоритм применения данного метода.

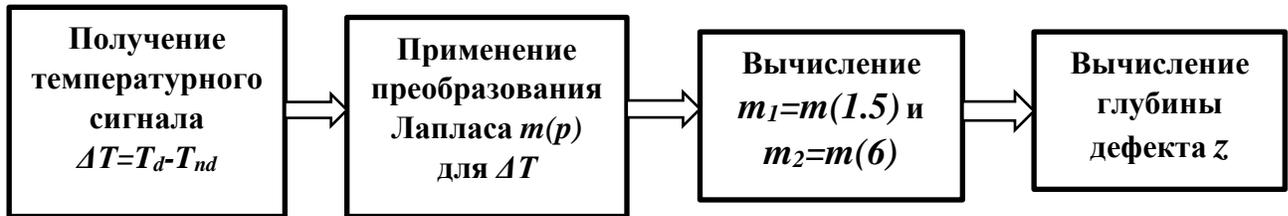


Рисунок 1.3 - Определение глубины дефекта с помощью преобразования Лапласа.

1.2.6 Нелинейная подгонка

В одностороннем ТК существует сильная корреляция между коэффициентом температуропроводности материала α и толщиной образца L (глубиной дефекта l), с одной стороны, и характерным временем наблюдения, с другой стороны. Фактически невозможно отдельно идентифицировать параметры α и L^2 , составляющие число Фурье $Fo = \alpha/L^2$. Соответственно, некоторые аналитические многопараметрические модели, реализующие концепцию нелинейной подгонки были предложены для оценки либо коэффициента температуропроводности материала, либо геометрических характеристик образца [54,55]. Такие модели могут быть аналитическими или численными, а аппроксимация может выполняться во временной или Лапласовской области с применением метода наименьших квадратов для минимизации разницы между теоретическими и экспериментальными данными [56].

Например, в диссертационной работе [57] рассмотрена одномерная двухслойная аналитическая модель, включающая тепловое сопротивление между слоями представленная в виде тепловых квадруполей (см. выше). Лапласовская температура передней поверхности была найдена путём решения уравнения (1.10), а обратное преобразование Лапласа было выполнено с применением алгоритма Гавера-Штефеста для возврата к реальным температурам. Модель учитывала теплопроводность, коэффициент диффузии и толщину каждого слоя, а также тепловое сопротивление дефекта и поглощённую энергию. Неизвестными параметрами были поглощённая энергия и глубина дефекта (толщина первого слоя). Алгоритм предоставил функцию наилучшего соответствия формулы (1.10) к заданному набору экспериментальных данных путём минимизации суммы квадратов разности между экспериментальными и теоретическими данными. Работа алгоритма подбора применительно к численным и экспериментальным данным будет проиллюстрирована в главе 2.

1.2.7 Применение искусственных нейронных сетей

Нейронная сеть представляет собой систему взаимосвязанных искусственных нейронов, которая включает ряд входов с заранее описанными весами, функцию активации и выход. Входные сигналы умножаются на определённые веса и суммируются для последующей обработки с помощью функции активации, и затем используются в качестве выходных сигналов (рисунок 1.4). Основное преимущество нейронных сетей состоит в том, что путём правильного выбора весов можно установить сложные отношения между входными и выходными данными.

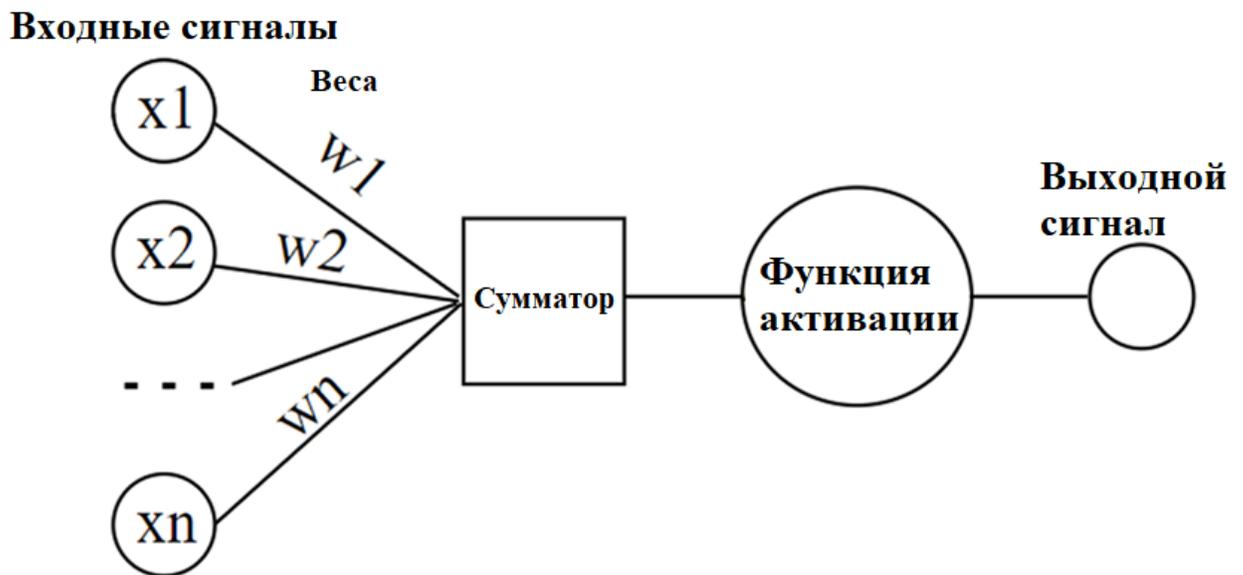


Рисунок 1.4 - Искусственный нейрон

Нейронные сети можно эффективно использовать как для обнаружения дефектов [58], так и для определения теплофизических характеристик. Двухэтапный алгоритм, описанный в [59], во-первых, обеспечивает сегментацию дефектных и бездефектных зон, и во-вторых, позволяет оценить глубину дефекта. Необработанные данные изменения температуры пикселей могут использоваться в качестве входных данных, хотя некоторые алгоритмы обработки данных, такие как преобразование Фурье, анализ главных компонент, полиномиальная аппроксимация и др., могут уменьшить объем входных данных и, таким образом, повысить эффективность определения характеристик дефектов. Подробное описание применения нейронных сетей в ИК термографии приведено в главе 3.

1.3 Выводы по Главе 1

На основании обзора современного состояния методов неразрушающего контроля, применяемых для испытаний авиационных ПКМ, можно сделать следующие выводы:

- множество различных методов НК применяют для испытаний композитов. Методы обладают своими преимуществами и недостатками. Не существует универсального метода, применимого для всех задач НК композитов;

- ИК термография является одним из наиболее перспективных направлений в области НК композитов. Метод сочетает в себе такие преимущества, как высокая производительность, иллюстративность результатов, относительно невысокая стоимость оборудования, чувствительность к типичным для композитов дефектам;

- ограничения ИК термографии связаны с трудностью обнаружения глубоких дефектов и дефектов с малым отношением поперечных размеров к глубине, а также со сложностью количественного анализа параметров дефектов;

- существует множество методов количественной оценки глубины дефектов, однако на момент начала диссертационного исследования практически отсутствовали публикации с исчерпывающим сравнением эффективности этих методов;

- большинство известных методов определения глубины дефектов основаны на одномерной модели теплопроводности и поверхностном нагреве. Следовательно, данные методы непригодны для оценки дефектов малых размеров (при влиянии трёхмерной диффузии тепла), а также при объёмном нагреве, например, при контроле полупрозрачных материалов, когда падающая световая энергия поглощается не только на поверхности, но и в толще контролируемого материала.

Выводы сделанные на основе главы 1 мотивировали автора заполнить существующие пробелы в области количественной оценки глубины дефектов методом импульсной ИК термографии, а именно:

- провести экспериментальное сравнение вышеописанных методов оценки глубины дефектов применительно к композитным материалам, сделать выводы об их эффективности и потенциале дальнейшего развития;

- модифицировать существующие и/или разработать новые методы оценки глубины дефектов, пригодные для полупрозрачных материалов и для дефектов малых размеров (с учётом трёхмерной тепловой диффузии).

Глава 2. Сравнение методов количественной оценки глубины дефектов в углепластике

Сравнение методов оценки глубины дефектов проводили при помощи трёхмерного численного моделирования в программе ThermoCalc-3D (ТПУ) и экспериментальных результатов с применением углепластикового образца с искусственными дефектами. Критерием сравнения была принята относительная ошибка измерения глубины:

$$\sigma_r = (h - h_{tr}) / h_{tr} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

где h_{tr} и h – истинная и расчётная глубина дефекта соответственно.

Следует заметить, что некоторые методы ТК, такие как импульсно-фазовая термография, метод реконструкции термографического сигнала и метод кажущейся тепловой инерции, применяют соответствующие алгоритмы к последовательности ИК термограмм, тем самым получая новые последовательности амплитудных/фазовых характеристик, производных температуры по времени, кажущейся тепловой инерции и др. Количественную оценку таких методов удобно производить при помощи отношения сигнал/шум, которое определяется по формуле:

$$SNR = \frac{|\bar{T}_d - \bar{T}_{ref}|}{\sigma_N} \quad (2.2)$$

где \bar{T}_d и \bar{T}_{ref} - среднее значение температуры в дефектной и бездефектной зоне; σ_N стандартное отклонение шума в бездефектной зоне, определяемое как:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3)$$

В таблице 2.1 представлена краткая характеристика используемых методов оценки глубины дефектов. Более детальное описание самих методов приведено в главе 1.

Таблица 2.1. Краткая характеристика методов оценки глубины дефектов.

Метод	Краткий алгоритм применения	Формула оценки глубины	Ограничения
Импульсно-фазовая термография (PPT)	<ul style="list-style-type: none"> - Применение БПФ - Определение слепой частоты f_b - Расчёт глубины дефекта по формуле 	$l = A\mu = A\sqrt{\alpha/\pi f_b}$,	Необходимо предварительно знать α и A
Метод тепловой инерции (АТИ)	<ul style="list-style-type: none"> - Расчёт кажущейся тепловой инерции в дефектной и бездефектной области - Нахождение минимума e/e_{nd} - Расчёт глубины дефекта по формуле 	$l = \sqrt{\alpha \tau_{min}} (e/e_{nd})_{min}^{0.95}$	Необходимо предварительно знать α
Метод раннего обнаружения (ЕО)	<ul style="list-style-type: none"> - Расчёт текущего контраста C_{run} - Определение времени, когда контраст начинает превышать уровень шума - Расчёт глубины дефекта по формуле 	$l = \sqrt{\alpha \tau_{min}} (C_{run}) \ln(2/C_{run})$	Необходимо предварительно знать α
Метод реконструкции термографического сигнала (TSR)	<ul style="list-style-type: none"> - Полиномиальная аппроксимация температурного сигнала в логарифмических координатах, определение коэффициентов полинома - Реконструкция обесшумленного сигнала - Вычисление 1й и 2й производных сигнала и их максимумов - Расчёт глубины дефекта по формуле 	$l = \sqrt{\pi \alpha \tau_w}$	Необходимо предварительно знать α
Метод тепловых квадруполь (TQ)	<ul style="list-style-type: none"> - Вычисление дифференциального температурного сигнала ΔT - Применение преобразования Лапласа к ΔT - Вычисление преобразования Лапласа $m(p)$ для двух значений p $p_2 = 4p_1$ 	$l = 1 - \frac{1}{\sqrt{p_1^*}} \ln \left[\left(\frac{m_1}{m_2} \right)^{0.5} \cosh(\sqrt{p_1^*}) + \left(\frac{m_1}{m_2} \cosh^2(\sqrt{p_1^*}) - 1 \right)^{0.5} \right]$	Выбор значений p_1 и p_2 влияет на результат. Выбор зависит от материала и требует дальнейших исследований. Необходимо предварительно знать L
Метод нелинейной подгонки (NLF)	<ul style="list-style-type: none"> - Выбор подходящей аналитической модели - Ввод известных параметров (α, L, k) - Нелинейная подгонка экспериментальных данных к аналитической модели методом наименьших квадратов 	-	Зависит от выбора подходящей аналитической модели. В примененной модели необходимо предварительно знать α, L, k
Нейронные сети (NN)	<ul style="list-style-type: none"> - Дизайн, обучение и верификация нейронной сети на большом объеме экспериментальных и аналитических данных - Предварительная обработка термографических данных для соответствия формату входа НС - Применение нейронной сети 	-	Материал, тип дефектов и установка контроля при обучении и использовании НС должны соответствовать.

2.1 Численное моделирование

Эффективность вышеупомянутых алгоритмов применительно к определению глубины дефекта проанализирована как на теоретических, так и на экспериментальных данных. Теоретические профили температуры были рассчитаны с помощью программного обеспечения ThermoCalc-3D, предназначенного для моделирования трёхмерной теплопроводности в многослойных твёрдых телах с дефектами. Численная модель представляла собой углепластиковую пластину размером $200 \times 200 \times 5$ мм, содержащую пять дефектов размером $20 \times 20 \times 0,1$ мм, заполненных воздухом. Размер ячеек сетки элементов $1 \times 1 \times 0,02$ мм.

Теплофизические свойства материалов, использованные в моделировании, приведены в таблице 2.2 (определены экспериментально на образце, описанном ниже, с использованием метода Паркера). Для простоты анализа углепластик считали изотропным, т.е. $k_x = k_y = k_z$.

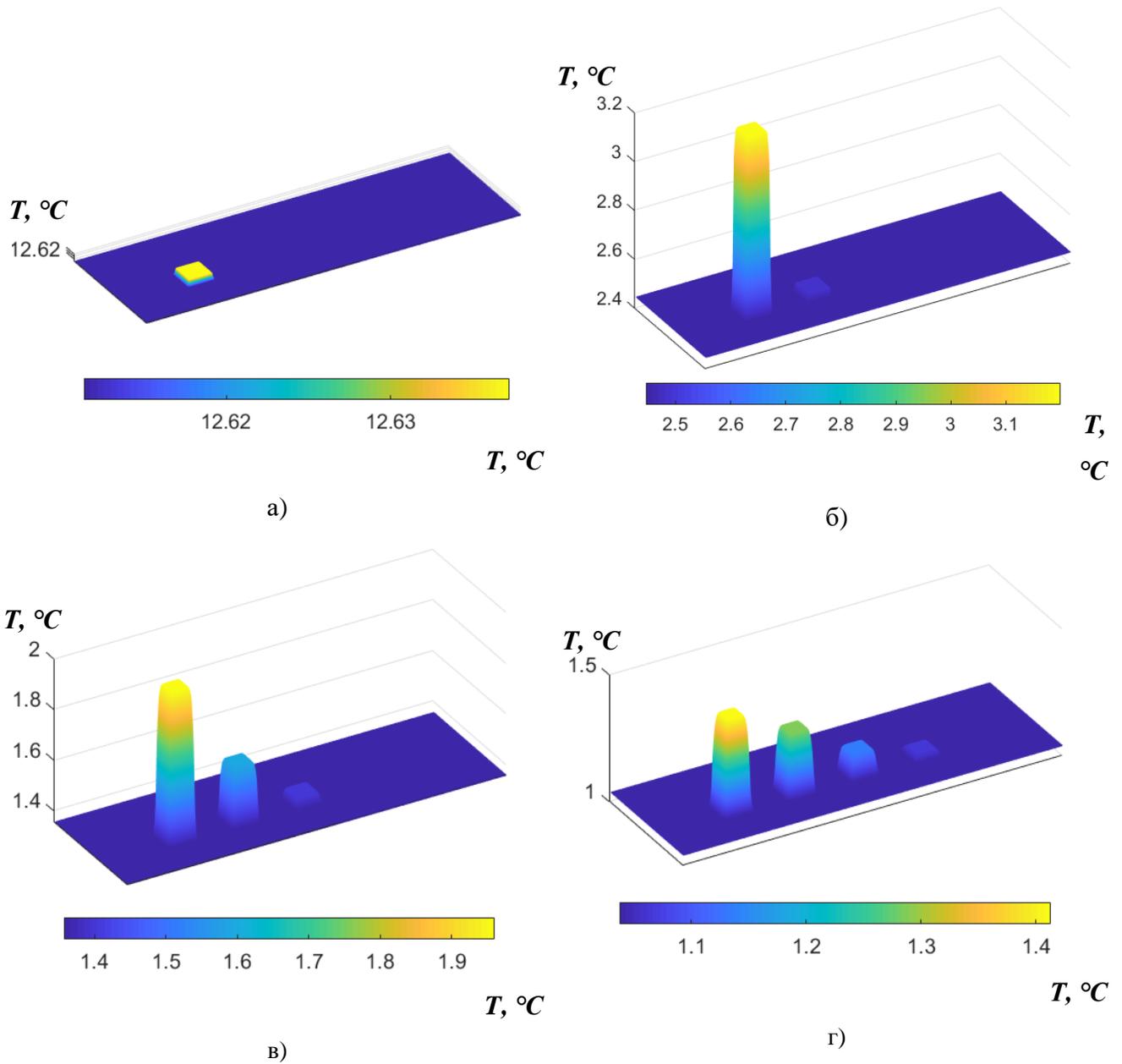
Таблица 2.2. Теплофизические характеристики материалов и параметры модели.

Характеристика	Материал	
	Углепластик	Воздух
k - теплопроводность, $\text{В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	0.56	0.07
α – температуропроводность, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	2.23×10^{-7}	5.8×10^{-5}
ρ – плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	1487	1.3
C – удельная теплоёмкость, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	1688.8	928.4
Толщина изделия/дефекта, мм	5	0,1
Глубина дефекта, мм	-	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5

Результат моделирования в программе ThermoCalc-3D представляет собой решение задачи нестационарной теплопроводности тела выбранных параметров с дефектами при поверхностном нагреве в заданном режиме. Режим нагрева представлял собой прямоугольный импульс (время нагрева $t_h = 0,1$ с, мощность $Q = 50 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$). Изменения температуры в каждой точке поверхности были рассчитаны с интервалом времени 0,1 с в течение 20 с. Таким образом, была получена последовательность изображений, включающая 200 синтетических ИК-термограмм. Для характеристики дефектов анализировали только точки изображения, расположенные над центрами дефектов. Стоит отметить, что результаты моделирования, полученные с указанными выше параметрами (t_h и Q), идентичны полученным, например, для $t_h = 0,01$ с и $Q = 500 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$,

т.е. временное разрешение достаточно для моделирования нагрева более коротким импульсом (при нагреве лампами вспышками $\tau_h = 0,001-0,01$ с).

Результаты моделирования представлены на рисунке 2.1 и иллюстрируют классическую особенность одностороннего ТК: после импульсного нагрева тепловые отклики дефектов появляются с задержками по времени, зависящими от глубины дефекта, и испытывают как диффузию в пространстве, так и замедление во времени.



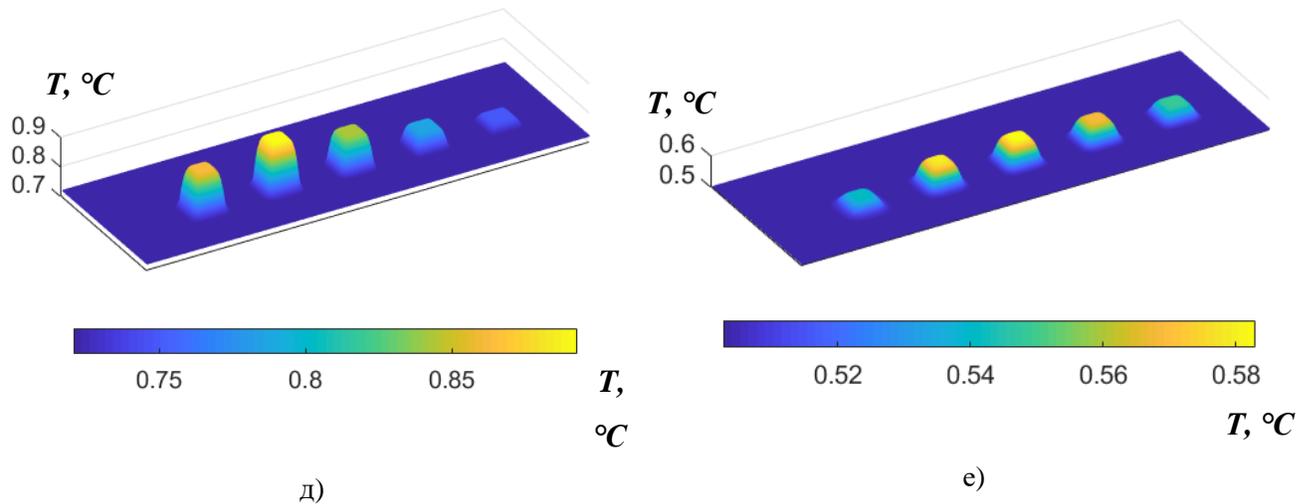


Рисунок 2.1 - Синтетические термограммы в различные моменты времени (углепластиковая пластина с 5 воздушными дефектами глубиной 0.5, 1, 1.5, 2 и 2.5 мм слева направо):

- а – время 0.1 с,
- б – 1 с,
- в – 3 с,
- г – 5 с,
- д – 10 с,
- е – 20 с.

2.2 Экспериментальная установка и образцы

Эксперименты проводили на образце из углепластика толщиной 6,2 мм, изготовленном методом ручной формовки композитов. Образец состоял из 25 слоёв углеродной ткани толщиной 0,2 мм каждый. Для моделирования дефектов использовали двойную плёнку политетрафторэтилена (ПТФ) толщиной 0,05 мм, размещённую между слоями ткани (рисунок 2.2).

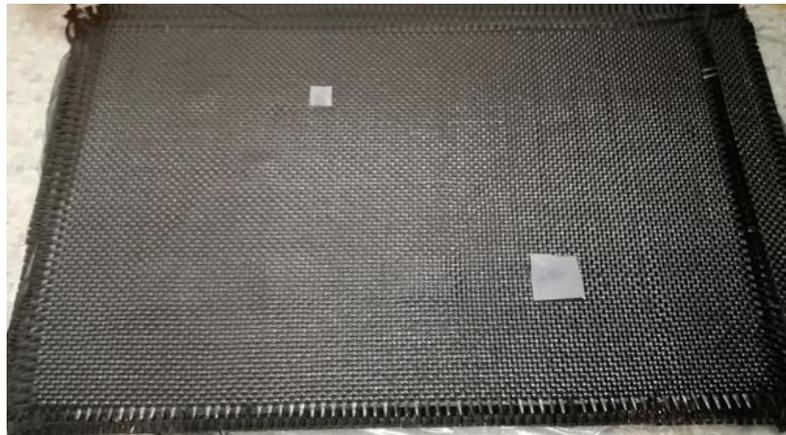
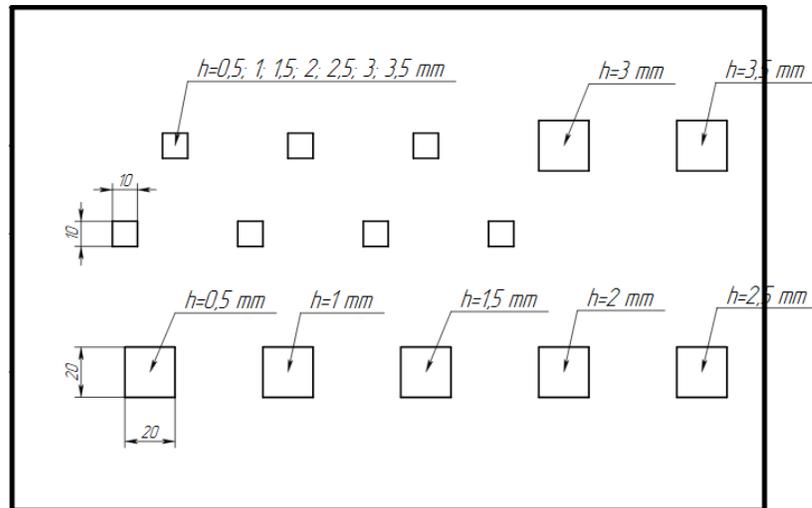


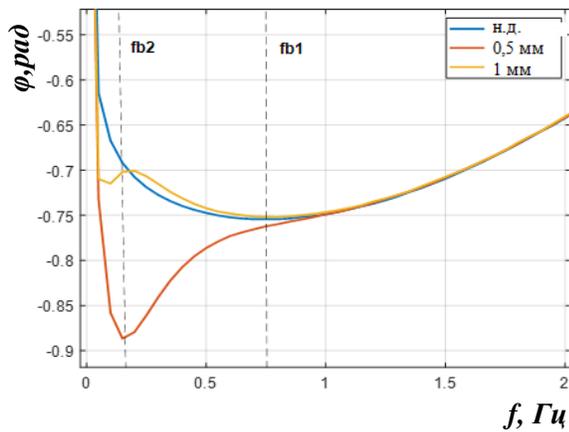
Рисунок 2.2 - Схема образца и вид дефектов между слоями в процессе изготовления.

Тепловую стимуляцию осуществляли двумя импульсными лампами (с общей энергией 14 кДж и длительностью импульса около 10 мс). ИК-термограммы регистрировали тепловизором FLIR A325sc в двух режимах, различающихся частотой регистрации (10 и 57 Гц) и длительностью 120 и 20 секунд соответственно, что объясняется квадратичной зависимостью временных параметров от глубины дефекта, необходимостью использования длительного времени наблюдения при применении преобразования Фурье и оптимизации времени вычислений и объема данных. Результаты испытаний обрабатывали с помощью программ ThermoFit Pro и MatLab. В данном исследовании глубину оценивали только для дефектов 20×20 мм, так как представленные методы основаны на одномерной модели теплопроводности и не учитывают

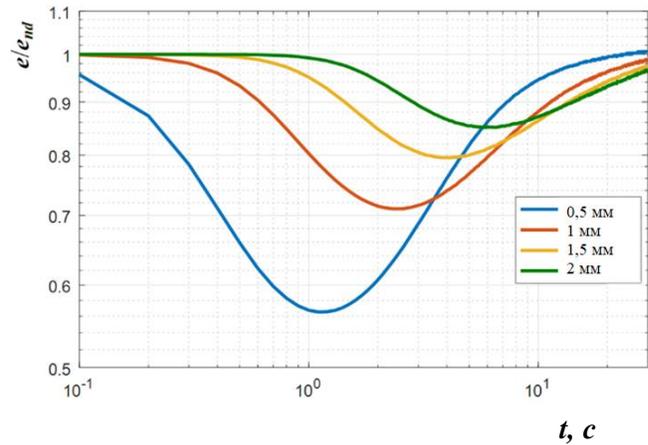
поперечную диффузию тепла. Перед дальнейшей обработкой данных во всех случаях применяли вычитание фонового изображения, что является стандартной процедурой при ИК термографии.

2.3 Результаты определения глубины на основе синтетических данных

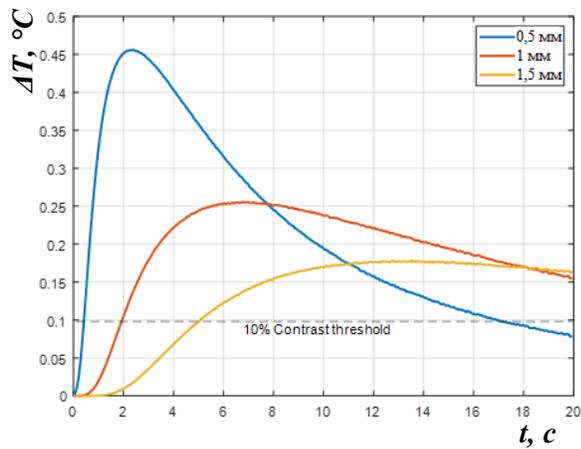
На рисунке 2.3 приведены иллюстрации определения глубины дефектов вышеописанными методами, которые были применены к синтетическим данным.



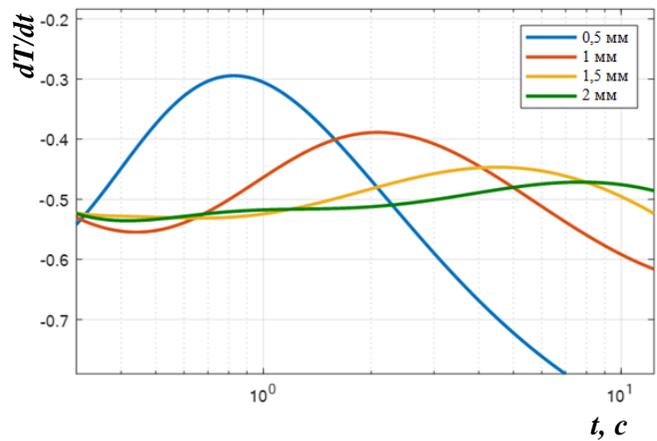
а)



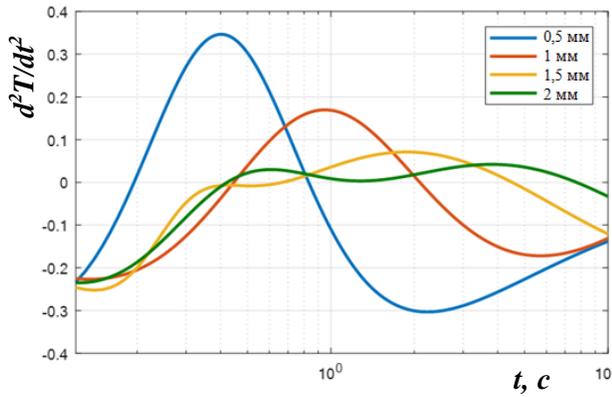
б)



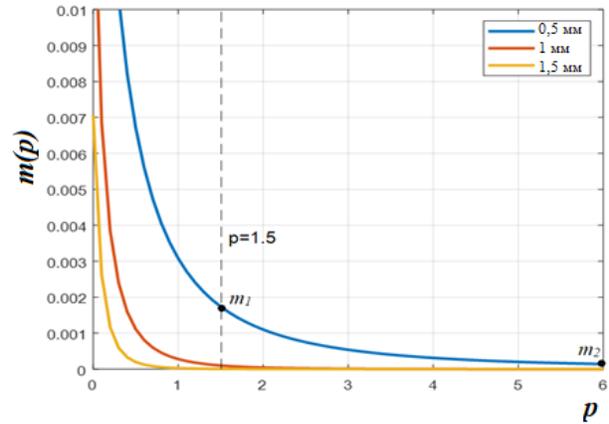
в)



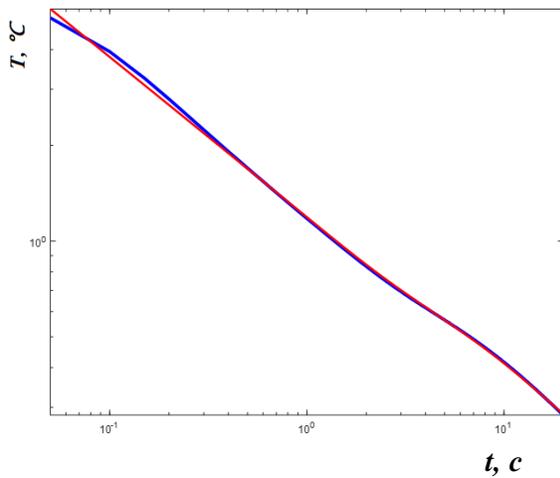
г)



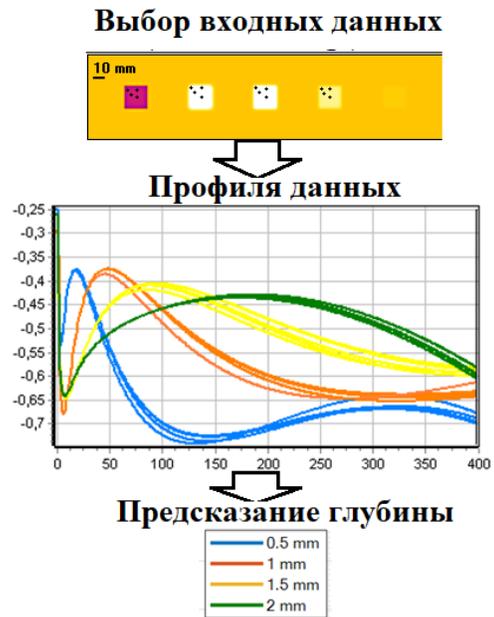
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 2.3 - Иллюстрации к определению глубины дефектов на основе синтетических данных:

- а – определение «слепой частоты» (PPT),
- б – определение кажущейся тепловой инерции АТИ),
- в – определение текущего контраста (ЕО),
- г – определение 1-й производной (TSR),
- д – определение 2-й производной (TSR),
- е – преобразование Лапласа для $\Delta T(\tau)$ (TQ),
- ж – нелинейная подгонка к аналитической модели (дефект глубиной 1.5 мм) (NLF),
- з – иллюстрация работы нейронной сети (НС).

Результаты оценки глубины дефектов на основе синтетических данных представлены в таблице 2.3. Относительная ошибка определения глубины различными методами, определённая по формуле 2.1, представлена на рисунке 2.4.

Таблица 2.3. Глубина дефектов, оценённая различными методами (на основе синтетических данных).

Истинная глубина, мм	Расчётная глубина, мм							
	PPT	ATI	EO	TSR, 1-я производная	TSR, 2-я производная	TQ	NLF	NN
0.5	0.55	0.54	0.46	0.68	0.47	0.49	0.45	0.5
1	1.08	0.99	1.02	1.08	0.73	1.96	1	1
1.5	1.6	1.47	1.57	1.59	1.02	1.6	1.49	1.5
2	2.07	1.83	2.14	2.08	1.46	1.7	2.06	2
2.5	2.92	2.04	2.76	2.6	1.92	4.5	2.78	2.5

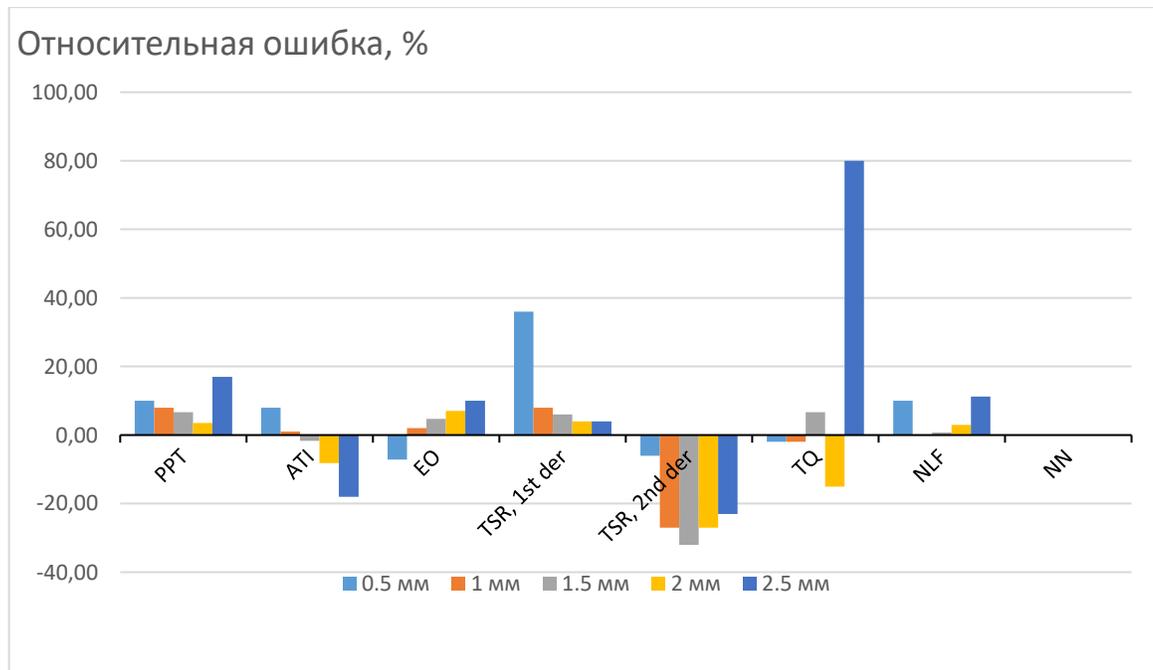


Рисунок 2.4 - Относительная ошибка определения глубины на основе синтетических данных (отрицательные величины означают недооценку глубины, положительные - переоценку).

Из таблицы 2.3 и рисунка 2.4 следует, что большинство используемых алгоритмов обеспечивают погрешности до 10% для дефектов на глубине от 0,5 до 2 мм. Интересно отметить, что величина ошибки больше для минимальной глубины 0,5 мм, что объясняется конечной длительностью теплового импульса и относительно низкой частотой кадров (в данном случае 10 Гц). Например, величина температуры для численной и аналитической моделей, показанных на рисунок 2.3 (ж), обнаруживает определённое несоответствие в начале процесса, что обусловлено конечной длительностью теплового импульса. Однако, обе модели становятся идентичными при значениях времени более 0,5 с, то есть в пять раз дольше, чем $\tau_h = 0,1$ с.

Для более глубоких дефектов поперечная диффузия тепла приводит к увеличению ошибок (более 10% для $l=2,5$ мм), поскольку все применяемые алгоритмы по существу одномерные. Наилучшие результаты, за исключением использования нейронных сетей, даёт метод TSR, поскольку время максимальной производной менее чувствительно к поперечной диффузии тепла. Метод TSR с использованием второй производной по времени, предложенный в [49] для стальных образцов, в нашем случае дал более точные оценки только для дефектов глубиной $l=0,5$ мм. Похоже, что определение более глубоких дефектов в материалах с низкой теплопроводностью может быть более эффективным, если использовать первую производную температуры.

В случае метода импульсно-фазовой термографии величина ошибки больше для менее глубоких дефектов, что можно объяснить недостаточной частотой записи термограмм и, соответственно, недостаточной точностью определения «слепой частоты». При более глубоких дефектах чувствительность к погрешности определения «слепой частоты» снижается. Также стоит отметить, что значение погрешности для дефекта глубиной 2,5 мм выбивается из общего тренда, что свидетельствует о влиянии поперечной диффузии тепла на результаты при глубине дефекта 2,5 мм и выше.

Использование преобразования Лапласа и формулы (1.13) дало наихудшие результаты при оценке глубины дефекта. В этом случае нет строгого правила для выбора двух значений p_1^* и p_2^* ($p_2^* = 4p_1^*$), и полученные значения l различны. Значение p_1^* было выбрано из диапазона от 0,5 до 5 для получения оптимального результата. Выше представлены результаты для $p_1^*=1,5$, при котором значение ошибки для большинства дефектов (0,5 – 2 мм) минимально. Однако для дефекта глубиной 2,5 мм ошибка составила 80%. При других значениях p_1^* можно её уменьшить, однако увеличивается ошибка для менее глубоких дефектов. Из этого можно сделать вывод, что величину p_1^* следует выбирать, основываясь на предполагаемом интервале глубин. Этот факт, с

учётом сложности вычислений, делает данный метод наименее перспективным для практического применения.

Метод нелинейной подгонки (NLF) к аналитической модели на основе тепловых квадрупольей оказался оптимальным с точки зрения погрешности оценки, за исключением использования NN, однако он является более сложным, затратным по времени, и требует большего объёма входных данных. Например, в применённом алгоритме помимо температуропроводности α , необходимо заранее определить коэффициент теплопроводности k . Данный метод удобно использовать для оценки глубины одиночных температурных профилей, однако применение алгоритма к полноразмерным последовательностям термограмм для визуализации карт дефектов требует слишком много времени счета, т.е. весьма высокой вычислительной мощности.

Использование искусственных НС для обработки синтетических данных в точках, расположенных над центрами дефектов, представляет собой особый случай, когда ошибки оценки стремятся к нулю. Однако такая НС вряд ли сможет работать на экспериментальных данных, искажённых шумом, неравномерным нагревом и сложной геометрией образца. Следовательно, НС должны быть обучены на экспериментальных данных, полученных на таких эталонных образцах, которые близко имитируют потенциальные тестовые случаи. Поэтому эффективность НС в сравнении с другими алгоритмами адекватно оценивать только при применении к экспериментальным данным.

2.4 Результаты определения глубины на основе экспериментальных данных

Поскольку приведённые выше формулы дефектометрии следуют из одномерных решений теплопроводности и не учитывают поперечную диффузию тепла, было предложено учитывать температуру в центрах дефектов. На рисунке 2.5 показан выбор дефектных и бездефектных участков в программном обеспечении ThermoFit. После ручного выбора зоны, содержащей дефект (чёрный квадрат) алгоритм автоматически определяет зону размером 5x5 пикселей с максимальным контрастом (синий квадрат). Бездефектные зоны выбирали вручную индивидуально для каждого дефекта и достаточно близко к нему, чтобы минимизировать влияние неравномерного нагрева (поглощённая энергия в дефектной и бездефектной области должна быть одинакова). Далее для получения температурных профилей учитывали среднее значение температуры в выбранных зонах.

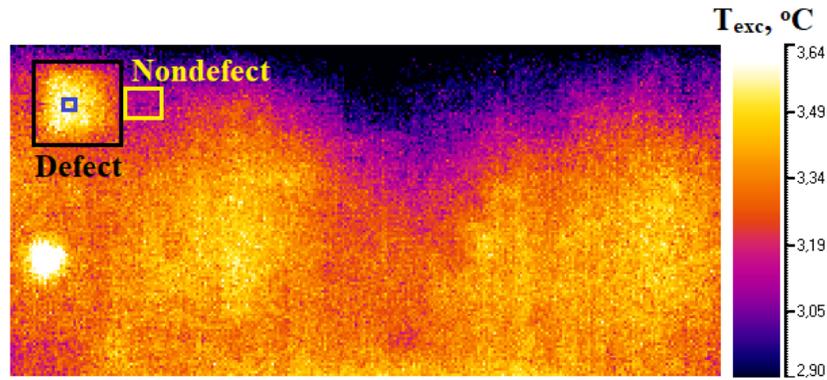


Рисунок 2.5 - Иллюстрация выбора дефектной и бездефектной зоны в программе ThermoFit Pro.

Изображение температурных профилей для дефектов глубиной 0.5 и 1 мм и в бездефектной области приведены на рисунке 2.6 а (в логарифмических координатах). На рисунке 2.6 б показаны результаты применения сглаживания методом полиномиальной аппроксимации. Сглаживание данных было необходимо, потому что операция деления имеет тенденцию усиливать высокочастотный шум, присущий температурным профилям, что затрудняет определение точек перегиба. Помимо производных температурного сигнала, для которых традиционно применяют полиномиальную аппроксимацию, сглаженные температурные профили применяли для определения глубины дефектов методами кажущейся тепловой инерции и раннего времени наблюдения, так как высокий уровень шумов мешал определению характерных точек. При применении других методов использовали необработанные температурные профили.

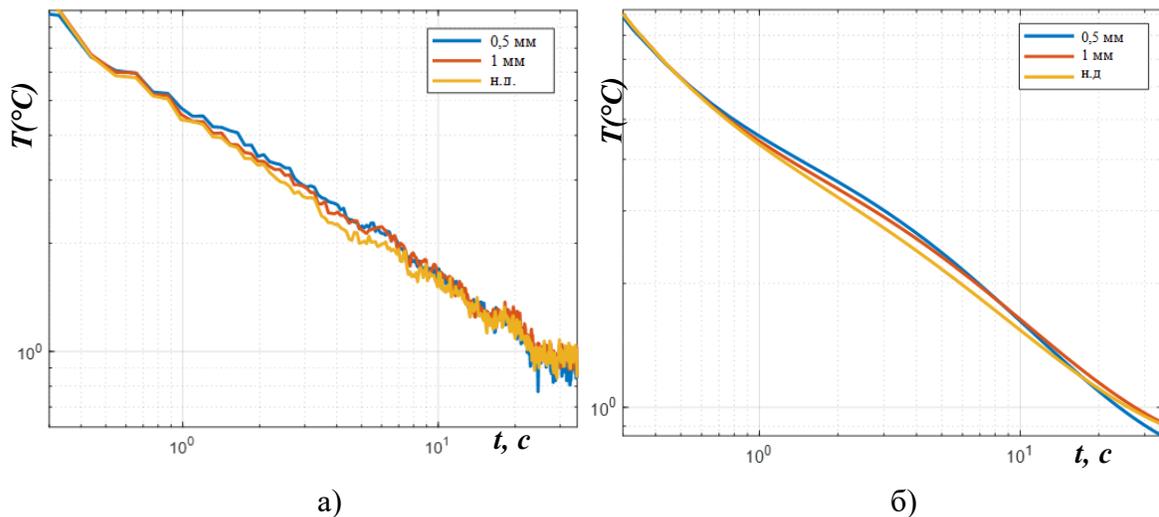


Рисунок 2.6 - Исходные (а) и сглаженные (б) температурные профили.

Результатом обработки последовательностей ИК термограмм методами импульсно-фазовой термографии, реконструкции термографического сигнала и кажущейся тепловой инерции являются последовательности изображений амплитудных/фазовых характеристик, производных температуры по времени, кажущейся тепловой инерции соответственно. Примеры таких изображений приведены на рисунке 2.7 (выбраны изображения с максимальной величиной отношения сигнал/шум для третьего дефекта, расположенного на глубине 1.5 мм).

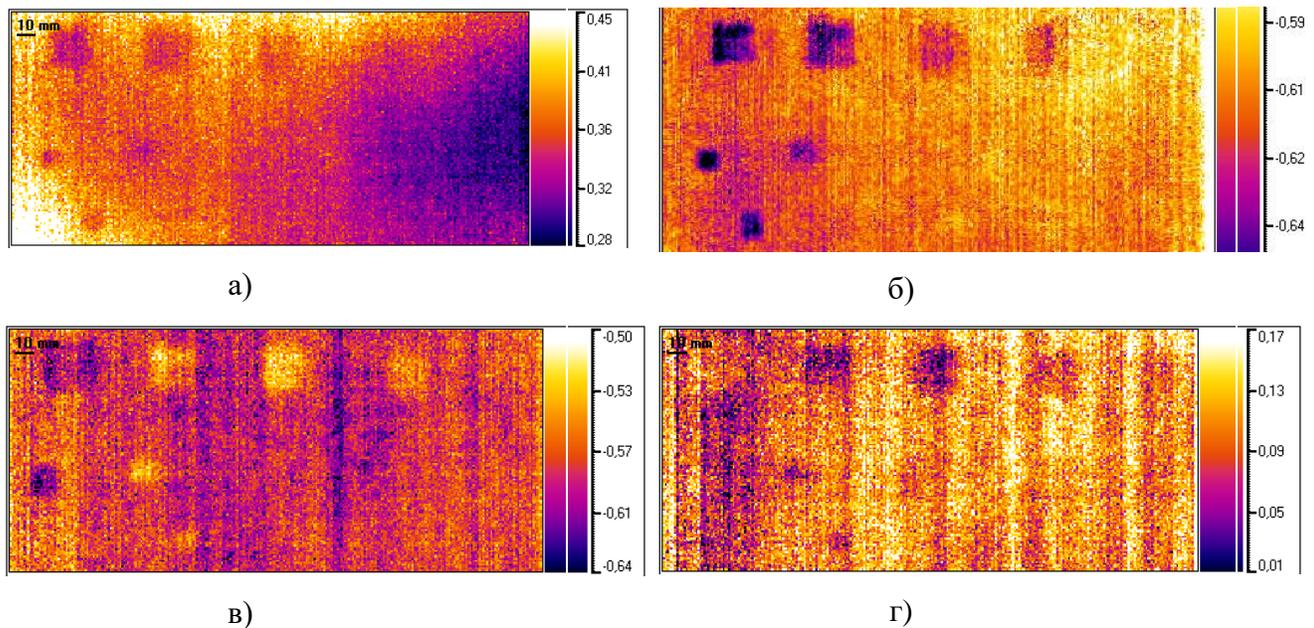


Рисунок 2.7 - Примеры экспериментальных результатов:

- а – карта кажущейся тепловой инерции (3 с после нагрева),
- б – Фурье-фазограмма (частота 0.018 Гц),
- с – изображение 1-й производной (3.2 с после нагрева),
- д – изображение 2-й производной (1.7 с после нагрева).

Эффективность вышеуказанных процедур ТК целесообразно сравнивать по отношению сигнал/шум (уравнение 2.2). Для остальных представленных методов сравнение по этому критерию неприменимо, поскольку метод раннего времени наблюдения оперирует с температурными контрастами при низких величинах отношения сигнал/шум, а другие алгоритмы имеют дело только с температурными профилями. На рисунке 2.8 показано сравнение величин

сигнал/шум для 4-х глубин дефектов и 5-ти методов обработки (включая исходное изображение с вычтенным фоном).

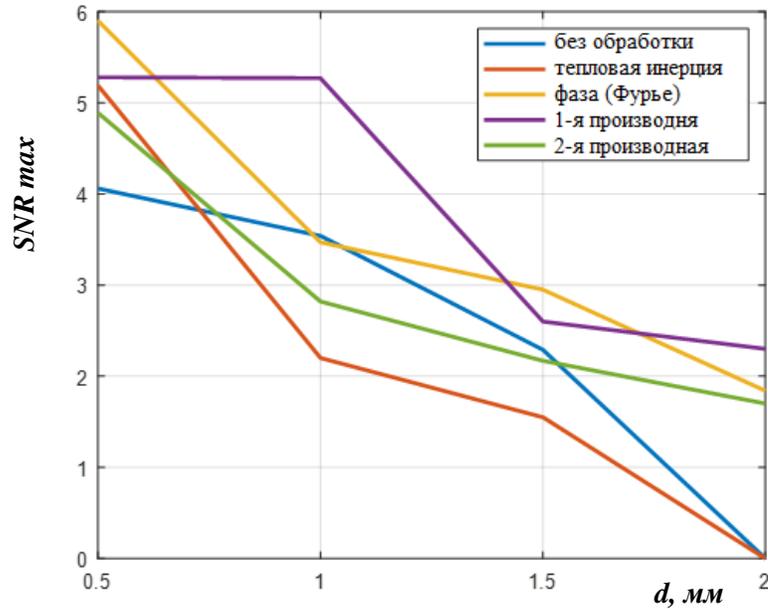
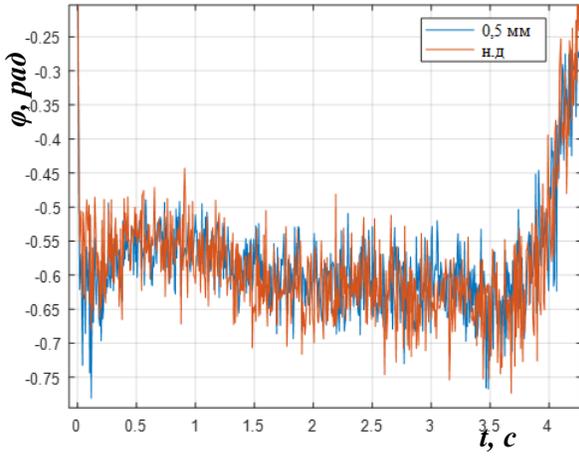
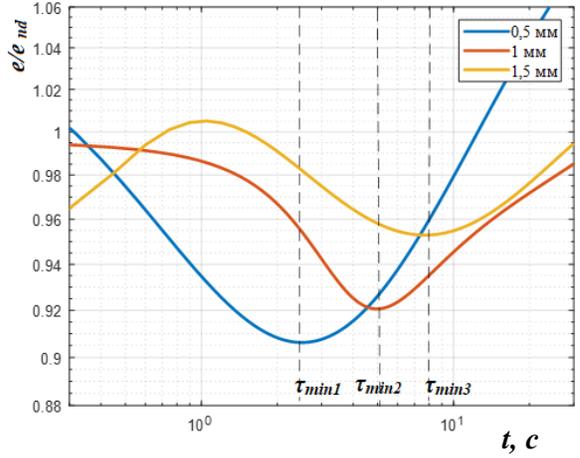


Рисунок 2.8 - Отношения сигнал/шум для дефектов различной глубины при применении различных методов обработки данных.

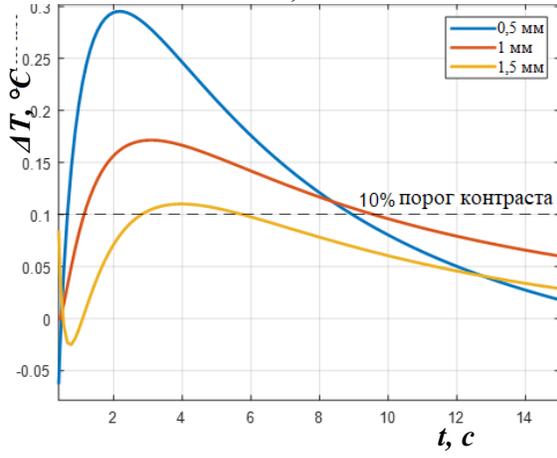
Дефект глубиной 2 мм был выявлен только на фазограммах и изображениях производных, причём максимальные величины отношения сигнал/шум получены на изображениях первой производной и фазограммах. Метод кажущейся тепловой инерции оказался наименее эффективным с точки зрения отношения сигнал/шум, причём результаты были хуже, чем для исходных термограмм. На рисунке 2.9 приведены иллюстрации к определению глубины дефектов всеми методами.



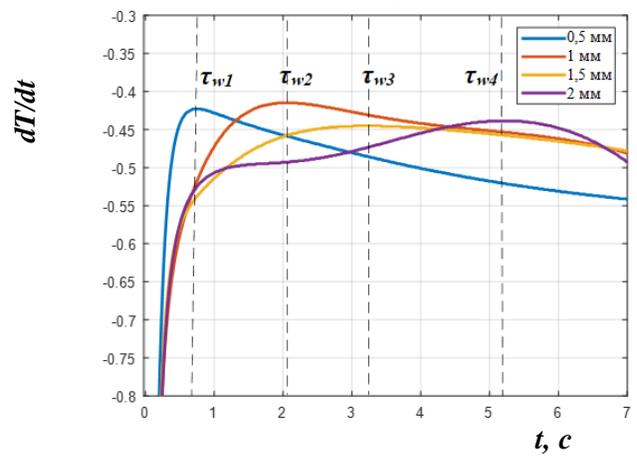
a)



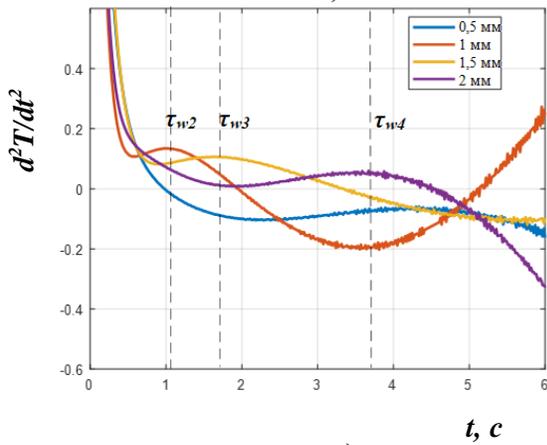
б)



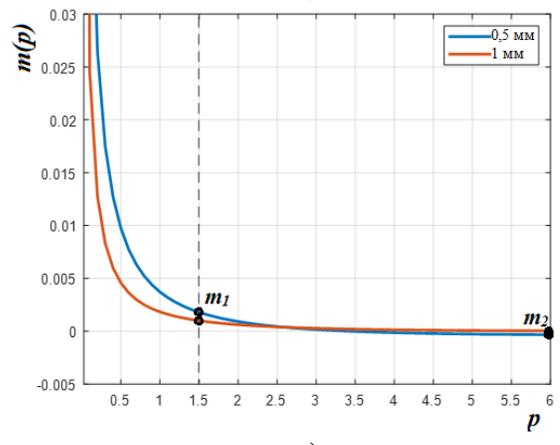
в)



г)



д)



е)

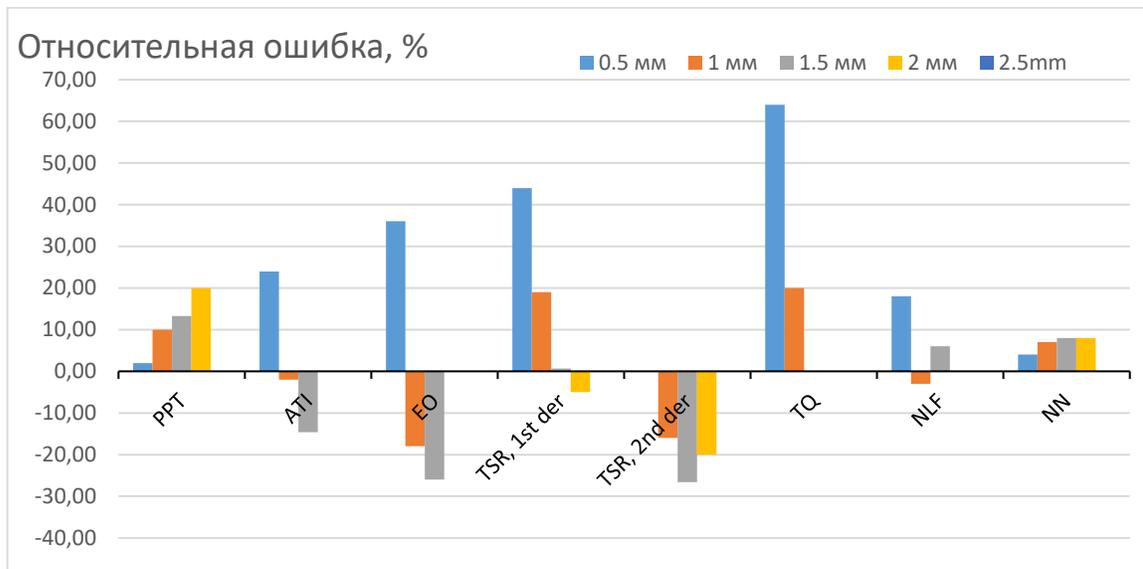


Рисунок 2.10 - Относительная ошибка определения глубины дефектов на основе экспериментальных данных (отрицательные величины означают недооценку глубины, положительные - переоценку).

Метод импульсно-фазовой термографии позволяет определить глубину дефекта по простой формуле, но на него значительно влияет поперечная диффузия тепла, и величина ошибки растёт с глубиной дефекта, в отличие от результатов, полученных на данных моделирования. Это объясняется тем, что при моделировании материал был принят изотропным, в то время как в реальном углепластике поперечный коэффициент теплопроводности больше коэффициента теплопроводности, направленного в глубь материала. Следовательно, влияние поперечной диффузии тепла для экспериментальных данных проявляется для менее глубоких дефектов по сравнению с данными моделирования. Кроме того, в отличие от метода тепловой инерции и температурных производных, «слепые» частоты затруднительно определить автоматически. Однако, средняя величина ошибки невелика по сравнению с другими методами. Относительная простота и низкая погрешность, а также отсутствие влияния неравномерного нагрева, делают данный метод одним из наиболее эффективных для оценки глубины дефектов, особенно, для дефектов большого размера по отношению к глубине их залегания.

Методы кажущейся тепловой инерции и раннего времени наблюдения сильно подвержены влиянию неравномерного нагрева, что требует тщательного выбора бездефектной области. Их достоверность ниже, чем при импульсно-фазовой термографии, поэтому данные методы проигрывают по сравнению с предыдущим методом.

Как упоминалось выше и подтверждено экспериментально (Таблица 5), при применении метода реконструкции теплового сигнала менее глубокие дефекты ($l < 1$ мм) следует оценивать с использованием второй производной, в то время как первая производная более пригодна для более глубоких дефектов, обеспечивая наилучшую достоверность оценки. Данный факт говорит о том, что в рассматриваемом образце нет чёткой линейной зависимости между глубиной дефекта и пиком производной. Однако, использование первой производной показало наименьшую погрешность в определении глубины самых глубоких дефектов (2 и 2,5 мм). Эффективность данного метода также показана в других исследованиях. Он не чувствителен к неравномерному нагреву, менее чувствителен к поперечной диффузии тепла и не требует выбора бездефектной зоны. Поэтому данный метод, вместе с импульсно-фазовой термографией, является одним из наиболее используемых в ТК.

Метод нелинейной подгонки к аналитической модели обычно применяют к необработанным температурным профилям, поэтому он кажется неэффективным для анализа более глубоких дефектов, которые производят зашумлённые сигналы. Фактически такие дефекты не видны на исходных термограммах, однако его преимуществом является возможность оценивать не только глубину дефекта, но и теплофизические свойства материала, поглощённую энергию, коэффициент теплообмена и т.п. при применении адекватной аналитической модели. Также данный метод является перспективным для оценки более трудных дефектных ситуаций (например дефектов малого размера или с малым тепловым сопротивлением), поскольку выбор подходящей модели позволяет учитывать различные параметры: поперечную диффузию тепла, тепловое сопротивление дефекта, теплообмен с окружающей средой и т.д.

Оптимальные результаты «глубинометрии» получены при использовании НС. К сожалению, изображение глубины дефектов («глубинограмма»), показанная на рисунке 15з, выявляет множество ложных дефектов. Наличие шума и сигналов с меньшей амплитудой от более глубоких дефектов приводит к идентификации недефектных точек в качестве дефектных. Следует заметить, что это справедливо и для других методов обработки изображений (рисунок 11).

Главным недостатком НС является ограниченность их применения данными, соответствующими тем данным, на которых производилось обучение. Иными словами, при изменении геометрии установки, частоты записи, времени или интенсивности нагрева, материала образца и типа дефектов каждая данная НС теряет актуальность. Вероятно, эта проблема может быть решена путём обучения НС на расширенных наборах данных, включающих различные

варианты геометрии контроля и различные типы дефектов, но это может ухудшить достоверность дефектометрии. Наиболее перспективной областью применения НС являются автоматизированные конвейерные производства стандартных изделий, то есть в тех случаях, когда объект контроля и параметры контроля не изменяются.

Проанализирована эффективность восьми алгоритмов определения глубины залегания дефектов методом ИК-термографии. Исследованы метод импульсно-фазовой термография (PPT), метод реконструкции термографического сигнала (TSR) с анализом первой и второй производных, 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 НС. 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 величины отношения сигнал/шум, а его результаты в меньшей степени зависят от неравномерности нагрева. Было установлено, что использование второй производной от динамической температуры в логарифмической системе координат малоэффективно для дефектов и/или включений с низкой теплопроводностью, расположенных на глубинах более 1 мм (для углепластика), в то время как первая производная оказалась в этом случае более эффективной. 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 зашумлённых экспериментальных данных. Метод нелинейной подгонки к аналитической модели позволил идентифицировать интегральные ТФХ исследуемого материала, параметры нагрева и т.п., однако данный метод оказался наиболее трудозатратным, особенно, при применении его к полноформатным ИК изображениям. Следует отметить, что применение сложных моделей при подгонке может позволить учитывать сложные феномены ТК, например, влияние поперечной диффузии тепла. Наилучшие результаты дефектометрии были получены при использовании

алгоритма на базе НС. Кроме того, данный метод перспективен для автоматизации процедуры дефектоскопии и дефектометрии, однако требует специфической процедуры обработки входных данных, а также оптимизации архитектуры НС.

Использование НС позволило выявить дефекты размером 20×20 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.

На основании проведённого анализа алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии было установлено, что для оценки глубины дефектов в полупрозрачных материалах наиболее перспективным является использование искусственных НС. Аналитическое моделирование дефектов в полупрозрачных материалах является громоздким и сложным, а использование методов дефектометрии, основанных на поверхностном нагреве, неприменимо к полупрозрачным материалам, поскольку нагрев оптическими средствами происходит по всей толщине такого материала. Определение глубины дефектов с учётом 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 НС, которые необходимо обучать на конкретных материалах и изделиях.

2.5 Выводы по Главе 2

На основании результатов, описанных в главе 2, выделены наиболее перспективные методы определения глубины залегания дефектов. В частности, аналитическое моделирование дефектов в полупрозрачных материалах является слишком громоздким и сложным, а прочие методы основаны на поверхностном нагреве и не могут применяться к полупрозрачным материалам, в которых нагрев происходит во всей толще материала. Наличие упрощённой аналитической модели, учитывающей поперечную диффузию тепла [60], делает данный метод более универсальным для определения параметров дефектов в различных материалах, что не обеспечивает метод, реализованный на базе НС. Таким образом, результаты проведенных исследований в рамках данной главы, определили направление дальнейших исследований, а именно:

- разработка метода оценки глубины дефектов в полупрозрачных материалах на основе искусственных НС;

- разработка метода оценки глубины дефектов с учётом поперечной диффузии тепла на основе нелинейной подгонки к аналитической модели.

Глава 3. Разработка метода оценки глубины дефектов в полупрозрачном стеклопластике при помощи искусственных нейронных сетей

Стеклопластик, наряду с углепластиком, широко распространён в авиакосмической промышленности, как материал, обладающий удачным сочетанием массы и прочности [25]. Метод ИК термографии обладает теми же преимуществами при контроле стеклопластиковых изделий, как и в случае углепластика. Однако, в отличие от углепластика, стеклопластик обладает свойством полупрозрачности в видимом и в инфракрасном диапазонах спектра, что может создать трудности при ТК с использованием оптических источников нагрева. Обычно эта проблема решается нанесением «чёрного» покрытия, обеспечивающего высокую поглощательную/излучательную способность, но такое решение часто неприемлемо на практике. Существующие исследования в области оптической ИК термографии полупрозрачных композитов, в основном, ориентированы на определение толщины образца и/или тепловых свойств материала [55,61], в то время как вопросы дефектоскопии и дефектометрии в полупрозрачных композитах исследованы слабо.

В данной главе проведено исследование влияния полупрозрачности композита на эффективность обнаружения расслоений в полупрозрачном стеклопластике при использовании импульсных ламп и лазерного нагрева.

3.1 Теоретические основы и аналитическая модель оптического ТК в полупрозрачном стеклопластике

В качестве первого шага анализа рассмотрен импульсный нагрев полубесконечного тела (рисунок 3.1). Оптическая энергия W на единицу площади (в Дж·м⁻²) полностью поглощается на поверхности непрозрачного тела (рисунок 3.1 а), вызывая, таким образом, только диффузию тепла в объёме материала. В случае полупрозрачного («st») тела (рисунок 3.1 б), поглощение оптической энергии происходит по всей толщине материала и описывается законом Бэра – Ламберта:

$$W_{st}(t, z) = W_{0\ st}(t) \exp(-kz), \quad (3.1)$$

где W_{st} - оптическая энергия, достигающая координаты z , $W_{0\ st}$ - оптическая энергия, падающая на поверхность тела, k - коэффициент поглощения, и z - координата глубины. Таким образом, в материале происходят одновременно оптический и тепловой процессы.

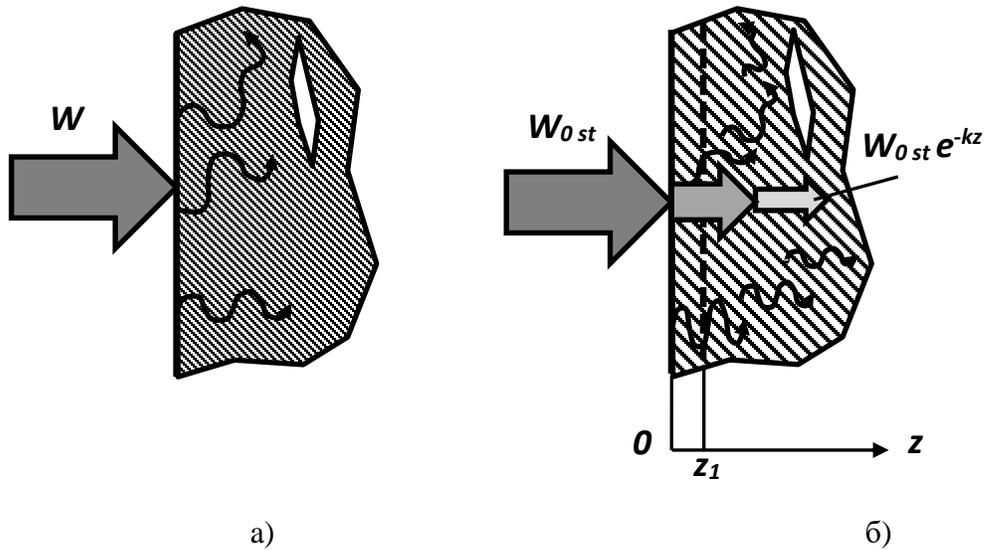


Рисунок 3.1 - Импульсный нагрев полубесконечного тела: а – непрозрачного, б – полупрозрачного

В случае нагрева адиабатического непрозрачного полубесконечного тела (рисунок 3.1 а), температуру поверхности можно выразить как:

$$T_{fl\ op}(t) = \frac{W}{e\sqrt{\pi t}}, \quad (3.2)$$

Или в логарифмических координатах:

$$\ln T_{fl\ op} = \ln \frac{W}{e\sqrt{\pi t}} = \ln \left(\frac{W}{e\sqrt{\pi}} \right) - \frac{1}{2} \ln t. \quad (3.3)$$

где $e = \sqrt{kC\rho}$ - тепловая инерция материала (k - теплопроводность, C - удельная теплоёмкость, ρ - плотность), t - время.

Предположим, что полубесконечное тело характеризуется коэффициентом поверхностного теплообмена h , а импульсный нагрев осуществляется внутренним источником, расположенным

на глубине z выделяющим энергию W (Дж·м⁻²) на единицу площади. В этом случае, температура поверхности описывается следующим выражением [6]:

$$T_{fl}(z = 0, \tau) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau}} \left\{ 2 \exp \left[-\frac{z_1^2}{4a\tau} \right] - bH \exp[H z_1 + aH^2 \tau] \operatorname{erfc} \left(\frac{z_1}{2\sqrt{a\tau}} + H\sqrt{a\tau} \right) \right\}, \quad (3.4)$$

где $b = W/(C\rho)$, a - температуропроводность, $H = h/K$.

Импульсный нагрев полубесконечного тела может быть представлен, как нагрев тела множеством внутренних источников, располагающихся на глубине $z = 0 \div \infty$. Тогда изменение температуры поверхности тела, нагретой множеством таких внутренних источников, равно:

$$dT_{fl}(z = 0, \tau) = \frac{dW_{st}}{C\rho\sqrt{\pi a \tau}} \exp \left(-\frac{z^2}{4a\tau} \right) - \frac{W_{st} dW_{st}}{(C\rho)^2 \sqrt{\pi a \tau}} [\exp(Hz + aH^2 \tau)] [\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + H\sqrt{a\tau} \right)], \quad (3.5)$$

где $dW_{st} = kW_{0st} \exp(kz) dz$ – тепловыделение внутри слоя, толщиной dz .

Выражение для изменения температуры поверхности T_{flst} можно найти как:

$$T_{flst} = \int_0^\infty dT_{fl}. \quad (3.6)$$

Предполагая, что $t \geq 0, H > 0, a > 0, K > 0$ и $z > 0$, решение интеграла (3.6) представляется в виде:

$$T_{flst} = \frac{W_{0st}}{K} \frac{ka \left(kc^{k^2 at} \operatorname{erfc}(k\sqrt{at}) - Hc^{aH^2 t} \operatorname{erfc}(H\sqrt{at}) \right)}{k-H}. \quad (3.7)$$

Температурные кривые, рассчитанные по формулам (3.2), (3.3) и (3.6), показаны на рисунке 3.2 как для непрозрачного, так и для полупрозрачного, адиабатического ($h=0$) и неадиабатического ($h=10$ Вт·м⁻²·К⁻¹) полубесконечного тела; все ТФХ приведены в описании рисунка. Обратите внимание, что значение $h=10$ Вт·м⁻²·К⁻¹ соответствует типичным лабораторным условиям, а значение $h = 0,01$ Вт·м⁻²·К⁻¹ указывает на квазиадиабатическую поверхность. Видно, что основное различие между кривыми проявляется сразу после нагрева, когда диффузия тепла сосредоточена в приповерхностном слое. При более длительных временах кривые для непрозрачных и полупрозрачных тел начинают сливаться, а различие между адиабатическими и неадиабатическими телами обусловлено теплообменом тела с окружающей

средой. Лучше всего различие между проанализированными тестовыми случаями наблюдается в логарифмическом представлении (рисунок 3.2).

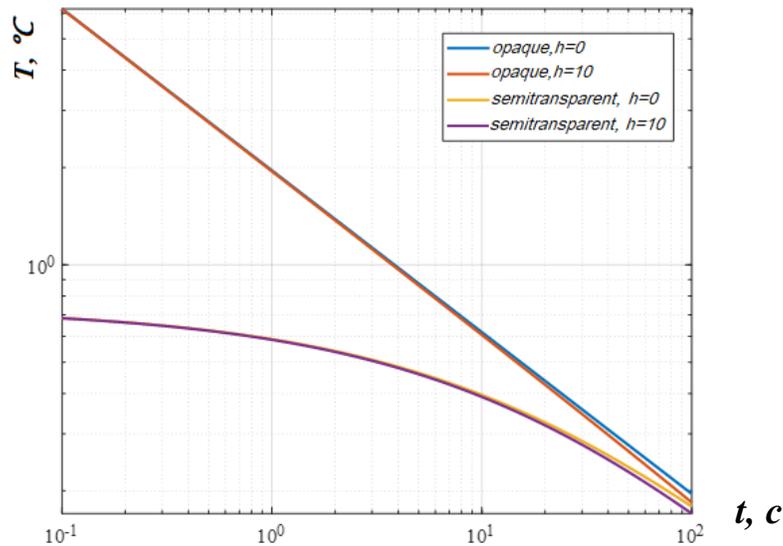


Рисунок 3.2 - Импульсный нагрев адиабатического и неадиабатического полубесконечного тела (аналитическое решение, $W=10$ кДж·м⁻², $k=1542$ м⁻¹, теплофизические свойства стеклопластика: $K=0.397$ Вт·м⁻¹·К⁻¹, $\rho=1611$ кг·м⁻³, $C=1150$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $a=2.14 \cdot 10^{-7}$ м²·с⁻¹, $h=[0, 10]$ Вт·м⁻²·К⁻¹)

3.2 Численное моделирование

Численное моделирование процесса трёхмерного теплопереноса в полупрозрачном твёрдом теле с неоднородными дефектами, нагретым оптическим излучением, было выполнено с помощью программы ThermoCalc-3D (Томский политехнический университет). Модельная пластина размером 100×100×5 мм из стеклопластика содержала четыре заполненных воздухом дефекта размером 20×20×0,2 мм на глубине 0,5, 1, 1,5 и 2 мм (ТФХ стеклопластика представлены на рисунке 3.2). Передняя поверхность пластины равномерно нагревалась квадратным тепловым импульсом мощностью 100 кВт·м⁻² и длительностью $t_h = 0,05$ с. Таким образом, энергия нагрева составила $W = 5$ кДж·м⁻². Предполагалось 2 режима поглощения энергии. В первом случае энергия полностью поглощается на поверхности, что соответствует непрозрачному материалу. Во втором случае излучение проникает в композит согласно формуле (3.1), что соответствует полупрозрачному материалу. Размер численной сетки составлял 100×100×100 узлов, т. е. 1

миллион узлов, при шаге по времени 0,05 с. Длительность теплового импульса и временной шаг расчёта были выбраны для достижения компромисса между временным разрешением теплового процесса и временем расчёта. Например, такие же результаты расчёта можно получить, если $t_h = 0,01$ с и $P = 500$ кВт·м⁻² (если характерное время теплового процесса значительно больше t_h). На рисунке 3.3 показан вид неадиабатической численной модели в интерфейсе программы и пример рассчитанных распределений температуры.

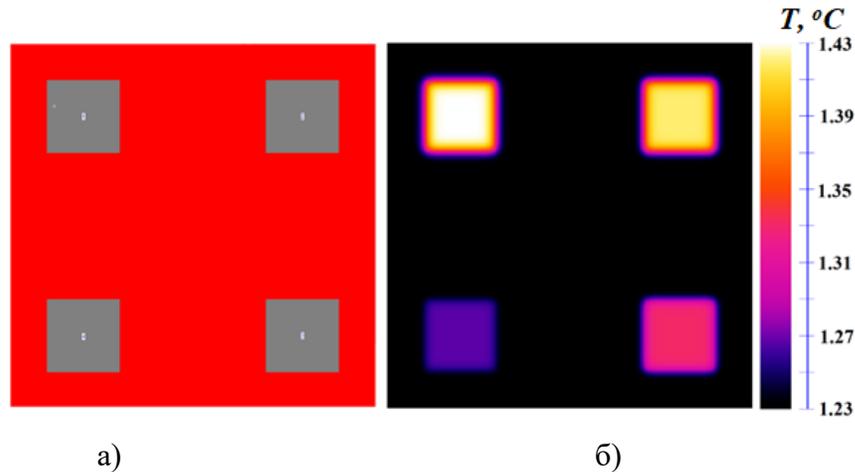


Рисунок 3.3 - Численная модель (а) и пример полученной термограммы (б) через 5 с после нагрева

Результатом моделирования в программе Thermo-Calc-3D являются синтетические последовательности термограмм. Графики изменения температуры в центре представленных дефектов представлены на рисунке 3.4. На рисунке 3.4 (а) показаны изменения температуры в бездефектной области и над дефектом глубиной 0,5 мм как для непрозрачных, так и для полупрозрачных образцов стеклопластика.

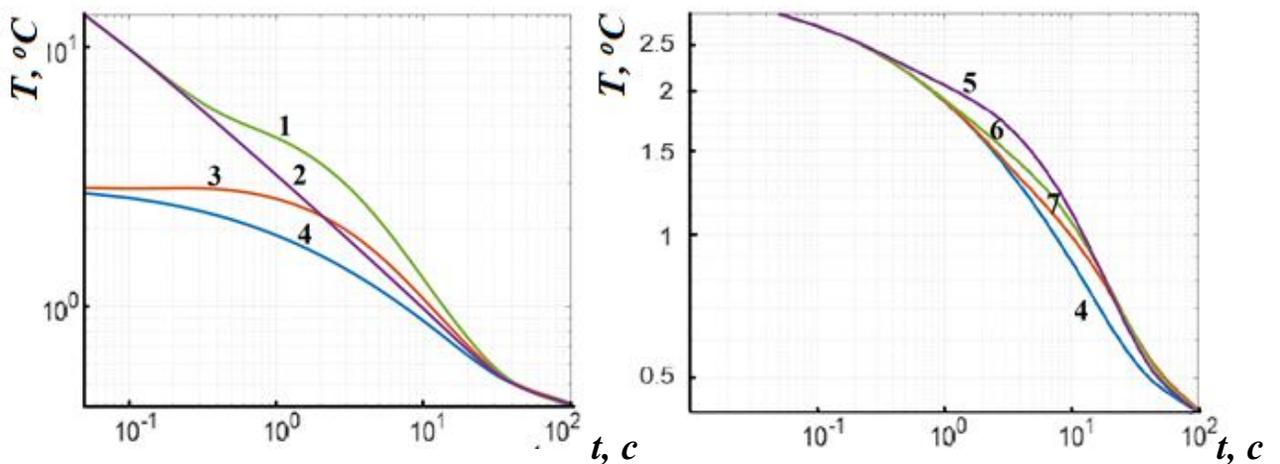


Рисунок 3.4 - Графики изменения температуры после импульсного нагрева, полученные численным моделированием:

- 1-центр дефекта глубиной 0.5 мм (непрозрачный материал);
- 2-бездефектная область (непрозрачный материал);
- 3- центр дефекта глубиной 0.5 мм (полупрозрачный материал);
- 4 -бездефектная область (полупрозрачный материал);
- 5- центр дефекта глубиной 1 мм (полупрозрачный материал);
- 6- центр дефекта глубиной 1.5 мм (полупрозрачный материал);
- 7- центр дефекта глубиной 2 мм (полупрозрачный материал).

Можно заметить, что в полупрозрачном материале дефект может быть обнаружен сразу после включения источника тепла за счёт определённой глубины проникновения оптического излучения. В случае полупрозрачного материала максимальная температура поверхности ниже почти на порядок (при $k = 1300-1600 \text{ м}^{-1}$) из-за меньшей поглощённой энергии, а форма логарифмических температурных кривых существенно отличается от «классического» непрозрачного случая. Напомним, что температура на поверхности непрозрачного полубесконечного адиабатического тела, нагретого импульсом Дирака, представляет собой прямую линию с наклоном $-0,5$, как показано на рисунке 3.2. Как следует из логарифмических кривых на рисунке 3.4 (б), сигналы разности температур между дефектными и бездефектными участками в случае полупрозрачного материала характеризуются меньшими амплитудами и появляются раньше, чем в непрозрачных материалах. Поэтому глубина дефекта не может быть определена традиционными методами, такими как импульсно-фазовая термография или метод реконструкции теплового сигнала, поскольку они используют формулы инверсии, основанные на физике поверхностного нагрева.

3.3 Экспериментальная установка и образцы

Образцы для экспериментальных исследований представляли собой две пластины из стеклопластика с матрицей из стеклополиамида и однонаправленной укладкой волокон. Образцы изначально содержали пропилены на задней стороне глубиной 1,2 и 3,3 мм. Затем образцы подвергли механической нагрузке на изгиб для получения расслоений, обозначенных на рисунке

3.5 как D1, D2 и D3 соответственно. Отметим, что дефекты D1 и D2 располагались друг под другом, что приводило к двойному расслаиванию. Глубина расслоений D1, D2 и D3 составляла 0,75 мм, 1,2 мм и 3,3 мм соответственно. Образцы помещались в прочный каркас, чтобы избежать их изгиб и обеспечить ширину раскрытия дефектов от 0,2 до 0,3 мм.

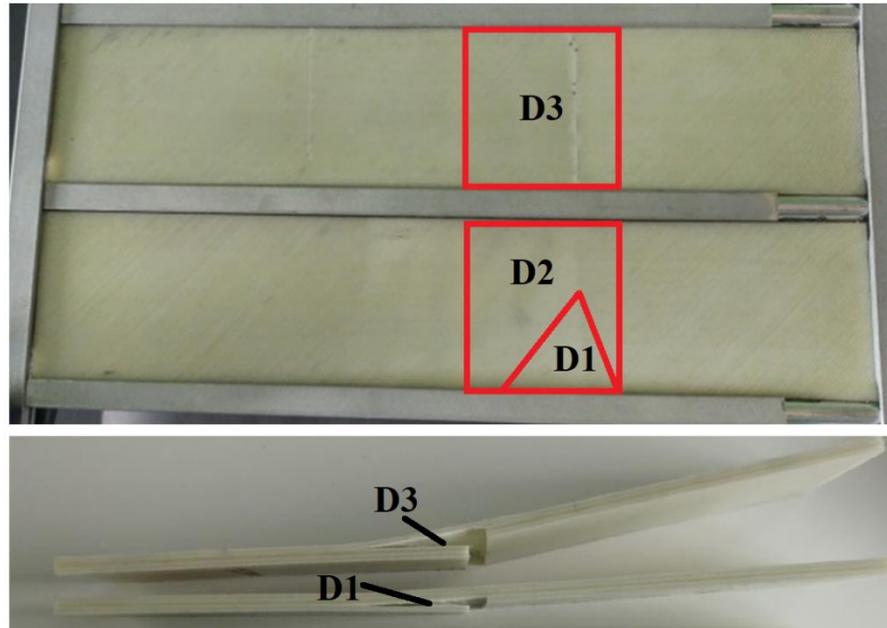
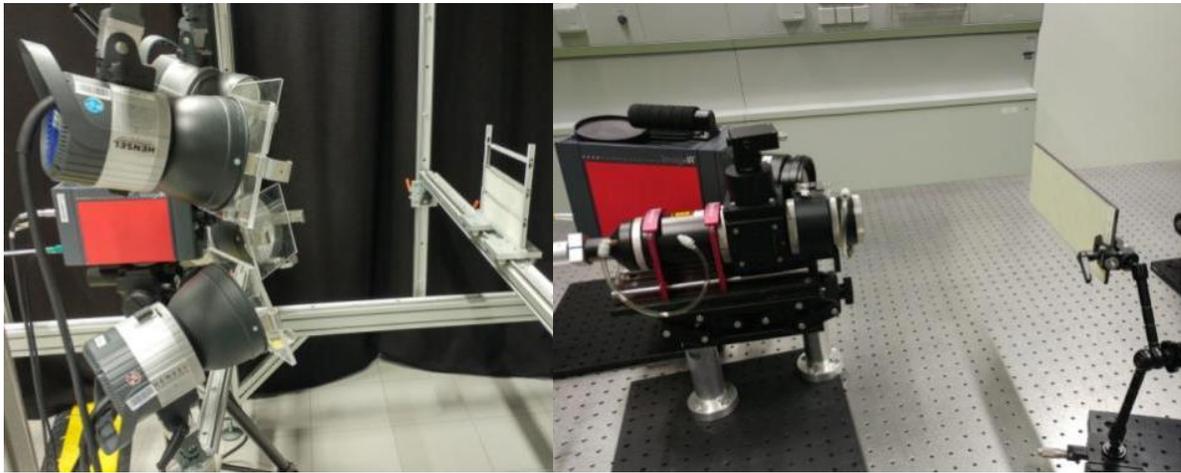


Рисунок 3.5 - Стеклопластиковые образцы с расслоениями.

Экспериментальная установка использовалась в двух конфигурациях (рисунок 3.6): с использованием четырёх ксеноновых импульсных ламп-вспышек с общей излучаемой энергией 24 кДж (а) и лазера мощностью 300 Вт, работающего на длине волны 935 нм (б).

В последнем случае лазерный луч расширяли с помощью специальной оптики на площадь 68×68 мм, а продолжительность нагрева составляла 0,4 с для обеспечения падающей энергии около 30 кДж/м^2 .



а)

б)

Рисунок 3.6 - Экспериментальная установка: а –оптический нагрев, б – лазерный нагрев

Испытания проводили на неокрашенных (полупрозрачных) образцах и повторяли после окрашивания лицевой поверхности образцов в чёрный цвет для сравнения со случаем непрозрачного материала, имеющего те же ТФХ. Образцы подвергали термографическому контролю с использованием двух тепловизоров: ImageIR 6800 и 8800, InfraTec, Германия, работающих в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-9,4 мкм с пространственным разрешением 1024×768 и 640×512 пикселей соответственно. Две камеры использовали для сравнения влияния эффекта полупрозрачности образцов в ИК спектре камер. Влияние полупрозрачности более значимо в случае применения коротковолновой камеры (3-5 мкм), в то время как на более длинных волнах (8-9,4 мкм) оптические свойства стеклопластика ближе к чёрному телу. Следовательно, при использовании длинноволновой камеры можно считать материал полупрозрачным только в видимом диапазоне и непрозрачным в спектральном диапазоне работы ИК тепловизора. Для непрозрачных образцов (окрашенных), результаты, полученные с применением коротковолновой камеры, оказались лучше, из-за меньшего уровня шумов и большего разрешения камеры.

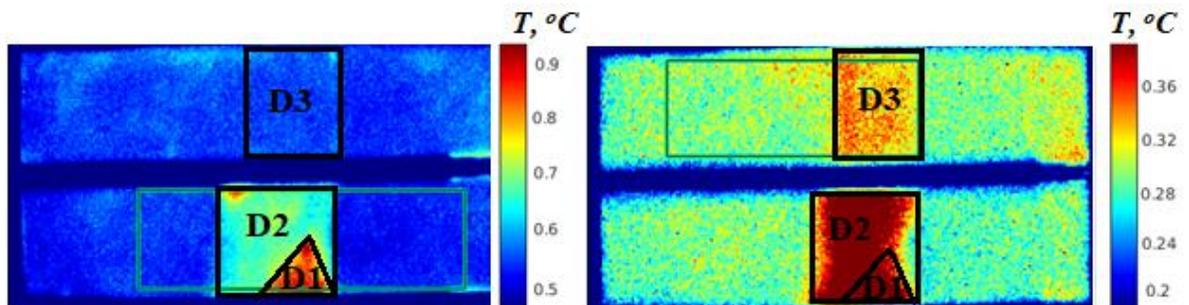
Первая часть экспериментального исследования включала в себя сравнение экспериментальных результатов при использовании двух вышеописанных тестовых установок: с нагревом импульсными лампами и лазером. Полученные последовательности ИК термограмм обрабатывались с применением двух вышеописанных методов: импульсно-фазовой термографии (раздел 1.2.1) и метода реконструкции термографического сигнала (раздел 1.2.4). Несмотря на то,

что, как отмечено выше, данные методы не позволяют определять глубину дефектов в материалах, обладающих свойством полупрозрачности в диапазоне спектра возбуждающего излучения, они представляют интерес для улучшения выявляемости дефектов. Сравнение эффективности двух источников тепловой стимуляции и двух методов обработки термографических данных производили по критерию отношения сигнал/шум (формула 2.1).

3.4 Экспериментальные результаты ИК термографического контроля с применением импульсных ламп

Ксеноновые импульсные лампы обеспечивают высокую мощность излучения, которая может превышать $10^6 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ в течение 5-10 мс, таким образом, математически представляя собой импульс Дирака в большинстве случаев неразрушающего контроля. Анализ температурных изменений - ключевая концепция тепловой дефектометрии. Как упоминалось выше, регулярное поведение температуры в логарифмических координатах искажается, если в теле имеются подповерхностные дефекты. Кроме того, если тело (пластина) имеет конечную толщину, логарифмическая температура поверхности в конце процесса изменяет наклон; фактически, температура поверхности начинает «ощущать» заднюю поверхность пластины. Кроме того, поверхностные тепловые потери также влияют на изменение температуры.

На рисунке 3.7 показаны ИК-термограммы двух полупрозрачных образцов стеклопластика при двух временах наблюдения (ИК-тепловизор ImageIR 6800). Аналогичные результаты были получены на окрашенных в чёрный цвет образцах, что доказывает возможность обнаружения расслоений в композите независимо от того, поглощается ли полностью энергия нагрева на поверхности образца или проникает в глубину. Соответственно, кривые изменения температуры на рисунке 3.8 количественно показывают, что максимальные дифференциальные температурные сигналы близки в двух исследованных случаях, даже если температуры поверхности различны; это подтверждает теоретический результат, ранее представленный на рисунке 3.4.



а)

б)

Рисунок 3.7 - ИК термограммы полупрозрачных образцов через 4 с (а) и 22 с (б) после нагрева ксеноновыми лампами, D1-D3 соответствует дефектам, отмеченным на рисунке 3.5.

Стоит отметить, что в случае полупрозрачного образца логарифмические температурные кривые на поверхности (рисунок 3.8 б) менее «искривлены» по сравнению с теоретическим предсказанием на рисунке 3.6, что, вероятно, можно объяснить не экспоненциальным характером поглощения в массиве материала и большим поглощением на поверхности (из-за особенностей поверхности материала).

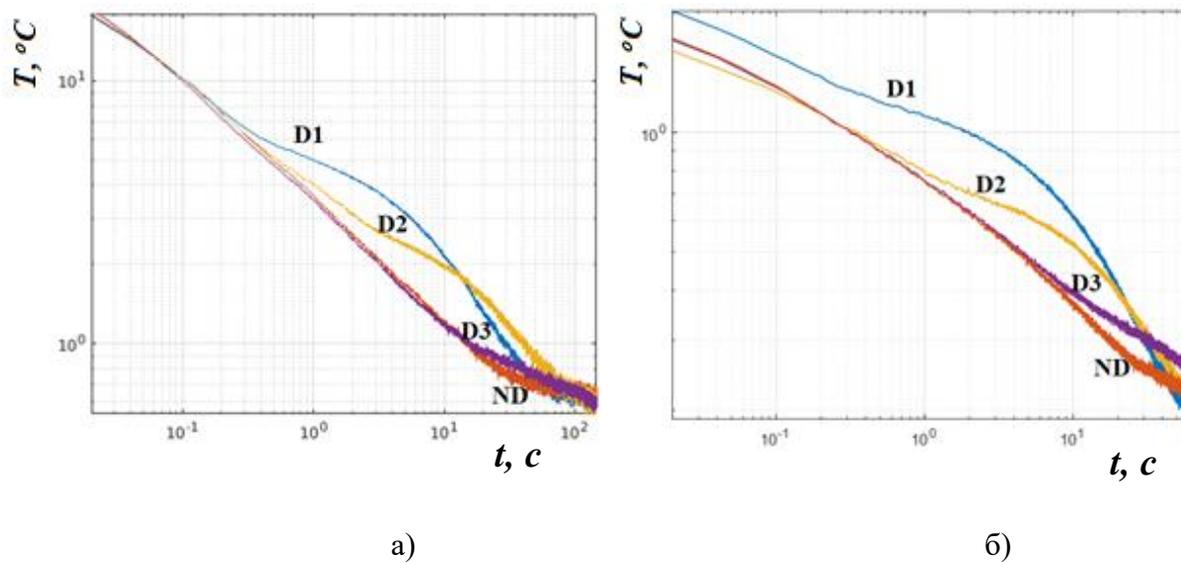


Рисунок 3.8 - Экспериментальные температурные профили в логарифмических координатах. Окрашенные (а) и полупрозрачные (б) образцы.

В таблице 3.1 приведены параметры испытаний, имеющие место как при обнаружении дефектов (максимальные значения отношения сигнал/шум), так и при определении различных характеристик процесса (значения f_b , рассчитанные с применением импульсно-фазовой термографии). Величины отношения сигнал/шум были рассчитаны путём определения средних значений сигнала и стандартных отклонений в областях, выбранных оператором над дефектами и в окрестностях. Как следует из рисунка 3.8 и таблицы 3.1, дефекты D1 и D2 лучше обнаруживаются в образце, окрашенном в чёрный цвет, в то время как самый глубокий дефект D3 даёт наибольшее значение отношения сигнал/шум в полупрозрачном образце, вероятно, потому, что больше энергии достигло дефекта в основной массе материала. Этот вывод подтверждается также более коротким временем наблюдения дефекта D3.

Таблица 3.1. Количественная оценка дефектов (SNR_m and f_b) на основе экспериментальных данных при нагреве импульсными лампами (t_{SNR_m} – время наблюдения максимального отношения сигнал/шум).

Дефект	Глубина дефекта, мм	Непрозрачный материал		Полупрозрачный материал	
		SNR_m / t_{SNR_m} , с (-bg)	f_b , Гц* /calculated depth, mm (PPT)	SNR_m / t_{SNR_m} , с (-bg)	f_b , Гц* /calculated depth, mm (PPT)
D1	0.75	15.2/5.3	0.63 /0.56	10.5/4.8	0.74/0.52
D2	1.2	7.06/19.2	0.13 /1.25	4.51/11.6	0.48/0.65
D3	3.3	2.30/45.6	0.027 /2.75	2.90/22.3	0.016/3.57

* Определена как максимальная частота, на которой дефект перестаёт обнаруживаться.

Таблица 3.2 и рисунок 3.9 иллюстрируют эффективность обработки данных с помощью методов импульсно-фазовой термографии и реконструкции термографического сигнала. В случае контроля полупрозрачного образца обработка в области Фурье не улучшила значение сигнал/шум, а в некоторых случаях даже ухудшила его. В свою очередь, метод реконструкции термографического сигнала при рассмотрении первой логарифмической производной улучшил выявляемость дефектов в полупрозрачном композите, но соответствующие кривые сильно отличались от кривых, соответствующих непрозрачному материалу.

Таблица 3.2. Сравнение методов обработки термографических данных при контроле полупрозрачного композита с применением ламп-вспышек

Дефект	Глубина дефекта, мм	SNR_m/t_{SNR_m} , с (без обработки)	SNR_m/f_{SNR_m} , Гц (PPT)	SNR_m/t_{SNR_m} , с (TSR, 1-я производная)
D1	0.75	10.5/4.8	12.5/0.3	43.2/2.2
D2	1.2	4.51/11.6	3.28/0.08	5.28/6.3
D3	3.3	2.90/22.3	1.98/0.01	3.27/8.9

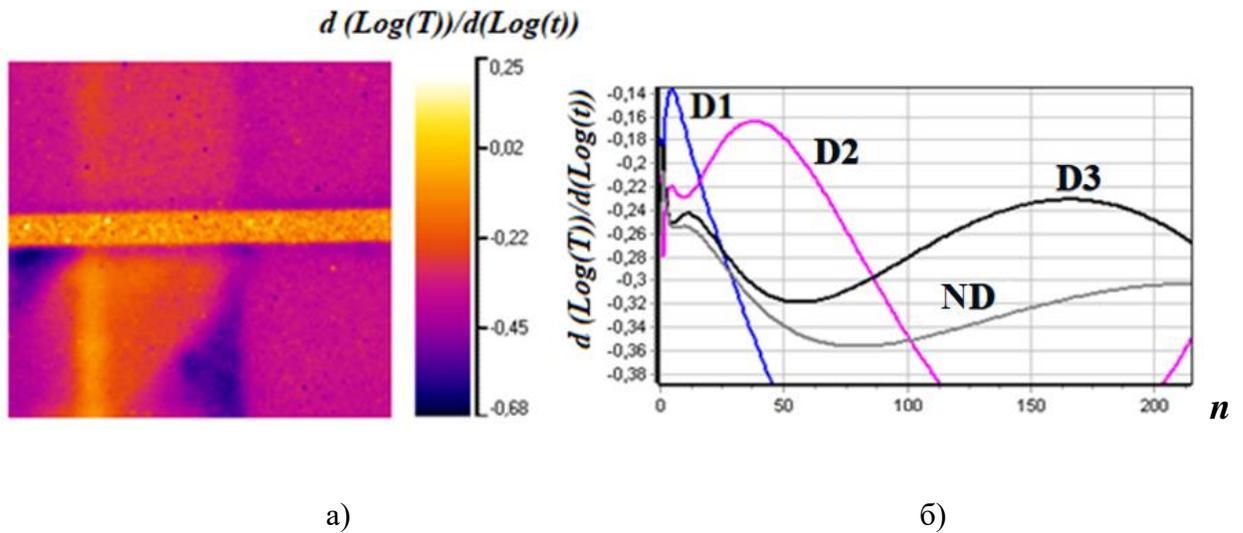


Рисунок 3.9 - Изображение (а) и графики изменения (б) первой логарифмической производной (нагрев импульсными лампами).

3.5 Экспериментальные результаты ИК термографического контроля с применением лазерного нагрева

Использование лазера в качестве источника нагрева даёт три преимущества: равномерное распределение энергии, монохроматический характер излучения и более простое определение поглощённой энергии благодаря лучшему знанию участвующих параметров. Последняя особенность лазерного излучения облегчает спектральный анализ поглощения энергии в полупрозрачных материалах по сравнению с поглощением широкополосного излучения галогенных и ксеноновых ламп. Поэтому при моделировании лазерного нагрева может быть использовано одно спектральное значение коэффициента поглощения на длине волны лазерного излучения. Недостатки использования лазеров: относительно небольшая площадь нагрева, более длительное время нагрева (в нашем случае) и более жёсткие требования безопасности.

Результаты, полученные при использовании лазерного нагрева, представлены на рисунке 3.10, 3.11 и в таблице 3.3. Фактически, этот тип оптической стимуляции обеспечивает самые высокие значения отношения сигнал/шум как для непрозрачных, так и для полупрозрачных композитов, а окраска поверхности в чёрный цвет улучшает обнаружение дефектов, расположенных на всех глубинах.

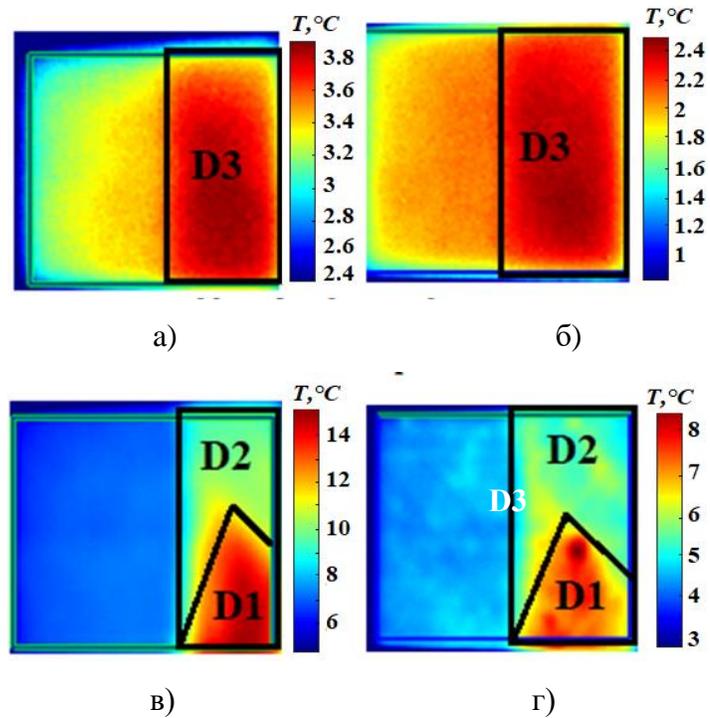


Рисунок 3.10 - ИК термограммы непрозрачного (а, в) и полупрозрачного (б, г) образцов через 5 (в, г) и 30 (а, б) с после лазерного нагрева.

Таблица 3.3. Максимальные величины отношения сигнал/шум и времена их наблюдения 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

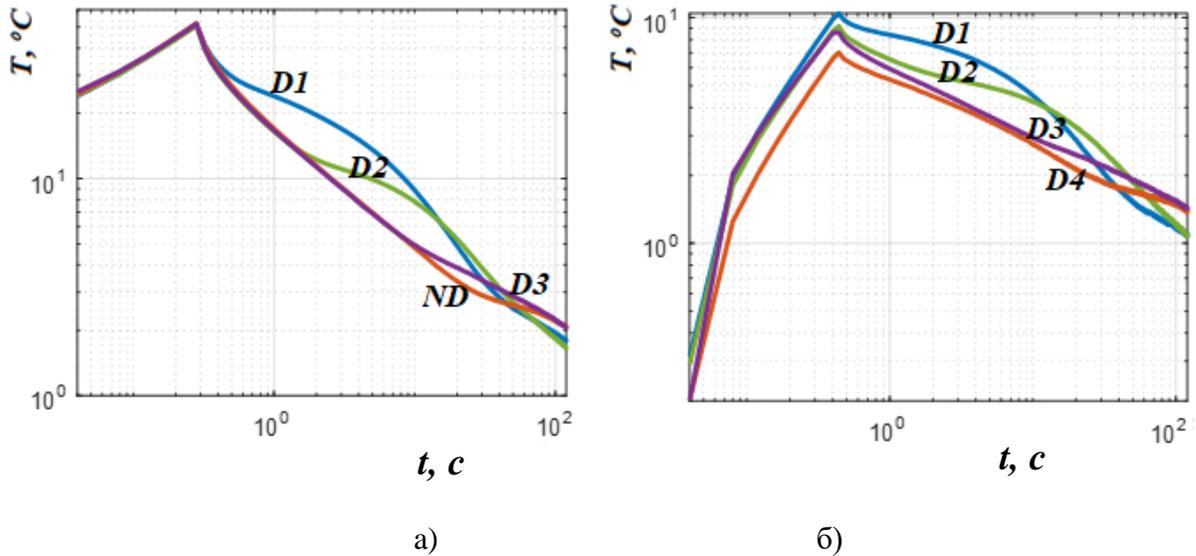


Рисунок 3.11 - Экспериментальные температурные профили в логарифмических координатах для непрозрачного (а) и полупрозрачного (б) образцов (лазерный нагрев).

3.6 Определение глубины дефектов в полупрозрачных материалах с помощью нейронных сетей

Искусственные нейронные сети (НС) метод анализа данных, основанный на подобию искусственных НС биологическим. Нейронные сети характеризуются количеством слоёв, количеством нейронов в каждом слое, активационной функцией нейронов и типом связей. Типичная НС состоит из входного слоя, одного или нескольких скрытых слоёв и выходного слоя. На вход каждого нейрона подаются данные из предыдущего слоя, умноженные на определённые веса. Они складываются и обрабатываются активационной функцией. Таким образом, формируются сложные наборы связей между входными и выходными данными. Процесс обучения НС представляет собой поиск оптимального набора весов для установления соответствия между входными и выходными данными.

Обилие входных данных - одна из проблем, связанных с использованием НС при обработке длинных последовательностей ИК изображений. Для уменьшения объёма данных были предложены ряд методов обработки, например, анализ главных компонент, полиномиальная аппроксимация, температурные контрасты и т. д. Весьма многообещающим оказалось использование логарифмических производных (метод TSR) [62]. В этом случае, основные компоненты или полиномиальные коэффициенты использовали в качестве входных данных

вместо множества исходных изображений, содержащих избыточную информацию. Однако, большая часть ранних исследований касалась «классических» непрозрачных эталонных образцов, содержащих дефекты в виде отверстий на задней стороне, и оценку глубины дефекта сводили к определению толщины образца, а термическое сопротивление дефекта не учитывалось в качестве обучающего параметра. Реальные дефекты в полупрозрачных материалах ещё больше усложняют тестовые ситуации, например, тепловое излучение может частично поглощаться или отражаться дефектами. В этих случаях НС вряд ли можно обучить с помощью ограниченного набора входных данных, таких как абсолютная температура или сигналы дифференциальной температуры, для прогнозирования глубины дефекта.

Как показано выше, для полупрозрачных материалов первая производная позволяет получить наилучшее отношение сигнал/шум. Поэтому в качестве входных данных для НС было решено использовать последовательность логарифмических производных в нужном пикселе. Выходные данные в нашем случае - толщина первого слоя, которая характеризует глубину дефекта или толщину объекта контроля. Длину последовательности и шаг по времени выбирают, исходя из предполагаемых глубин дефектов, толщины объекта и необходимой точности. В конкретном случае использовали последовательность из 100 изображений с частотой 5 Гц, полученная после обработки экспериментальных данных лазерной термографии (Рисунок 3.9, 3.10). Количество слоёв и нейронов подбирали, исходя из необходимой точности и оптимального времени обучения. В данном случае приемлемая достоверность работы нейросети достигнута при трёх скрытых слоях размером 15, 15, и 5 нейронов с сигмоидальной активационной функцией. Выходной слой содержал линейную функцию активации, как показано на рисунке 3.12.

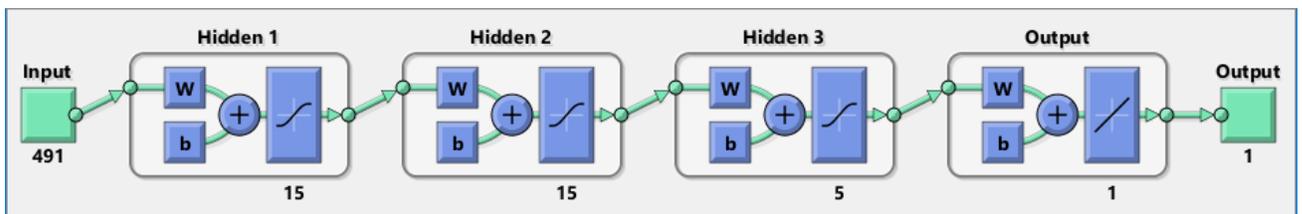


Рисунок 3.12 - Вид нейронной сети в интерфейсе Matlab.

На рисунке 3.13 приведено расположение дефектных и бездефектных зон, размером 10x10 пикселей, выбранных для обучения нейросети. Выходы сети состоят из 4-х значений глубины дефектов - 0,75; 1,2; 3,3 и 5 мм. (5 мм для бездефектных областей).

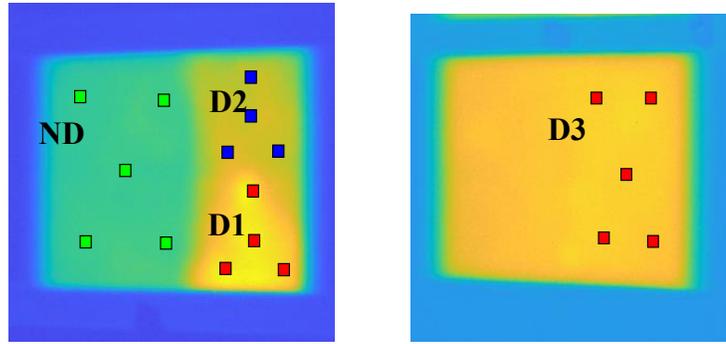


Рисунок 3.13 - Расположение областей для обучения НС.

На рисунке 3.14 представлен результат работы НС, применённой к экспериментальным данным. Результат представлен в виде глубинограмм - изображений, в которых амплитуда каждого пикселя соответствует определённой глубине в миллиметрах.

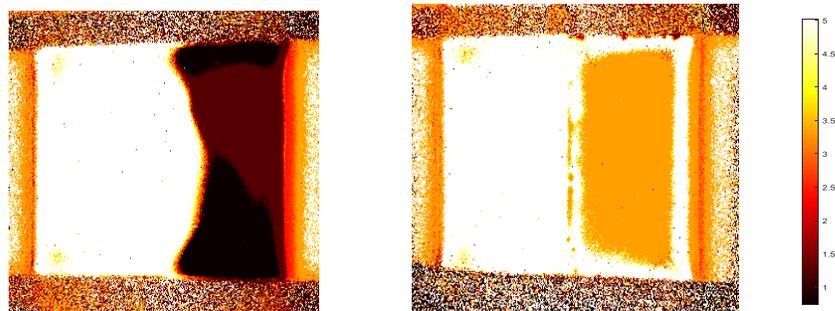


Рисунок 3.14 - Глубинограммы полученные при помощи НС.

Восстановленные значения глубины дефекта были близки к истинным (с ошибками менее 5%), за исключением граничных пикселей, где имела место значительная поперечная диффузия тепла.

Недостатком данного метода является необходимость соответствия входных данных данным, по которым выполнено обучение НС. Оптимизации подлежат параметры входных данных (частота и количество входных переменных), параметры нагрева (мощность, расстояние до объекта) и ТФХ объекта контроля.

3.7 Выводы по Главе 3

В 3-й главе проведено сравнение эффективности использования импульсной и лазерной ИК термографии при контроле полупрозрачных образцов из стеклопластика с искусственными

расслоениями. Также проведено сравнение результатов термографического контроля для полупрозрачных и непрозрачных материалов. Для этого поверхность полупрозрачных образцов была окрашена чёрной краской при проведении дополнительного цикла экспериментов.

Было показано, что максимальные величины отношения сигнал/шум могут быть достигнуты при использовании лазерного нагрева (таблица 3.1), кроме того, данный тип нагрева также представляется перспективным для определения характеристик дефектов.

Традиционная оптическая стимуляция с использованием ксеноновых импульсных ламп, применённая к полупрозрачным материалам, не позволила определить параметры дефектов, в частности, глубину их залегания, путём применения алгоритмов, разработанных для непрозрачных материалов, а именно, импульсно-фазовой термографии и реконструкции термографического сигнала. При использовании последнего алгоритма величины SNR были улучшены, анализируя логарифмические производные температуры, в то время как импульсно-фазовая термография продемонстрировала меньшую эффективность.

Разработана НС, позволяющая определять глубину дефектов в рассмотренных образцах. Результатом работы нейронной сети являются глубинограммы, иллюстрирующие глубину дефектов в каждом пикселе. Бездефектные области на картах глубин характеризуются величинами, равными толщине образца, а 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. Более подробное исследование влияния выбора предварительной обработки входных данных на результаты работы НС описано в работе [62].

Особенностью метода является необходимость соответствия параметров температурных данных, на которых проводят обучения НС, параметрам данных, которые затем подаются на вход НС для проведения дефектоскопии и дефектометрии. Это требование относится к частоте записи термограмм и их количеству, а также мощности и длительности нагрева и ТФХ контролируемого материала. Следует отметить, что в проведённом 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. Разработка метода оценки глубины дефектов малых размеров при помощи нелинейной подгонки к аналитической модели

Определение глубины и размера дефекта является важной процедурой, направленной на оценку качества и срока службы ответственных деталей и компонентов, включая обоснование необходимости ремонта.

Количественной оценке глубины посвящено множество публикаций [19,40,43,49,63]. Многие исследования устанавливают пропорциональность между квадратом глубины дефекта и соответствующим специфическим характерным временем (СХВ) теплопередачи. Время максимальных температурных дифференциальных сигналов (пиковый контраст), время максимальных логарифмических производных или некоторые специфические параметры, полученные с помощью специальных преобразований температуры, можно рассматривать в качестве СХВ [64]. D. Marinetti и др. предложили анализировать эволюцию температуры в частотной области и использовать так называемую «слепую частоту» для определения глубины дефекта [42]. Все вышеупомянутые методы основаны на одномерной модели теплопроводности, поэтому они подходят для оценки вытянутых в поперечном направлении дефектов, характеризующихся высоким соотношением размеров и глубины, то есть так называемых одномерных дефектов. Другими словами, предлагаемые формулы инверсии глубины не учитывают размер дефектов и влияние трёхмерной диффузии тепла. При больших значениях СХВ температурные сигналы деформируются из-за диффузии тепла, что приводит к большим неточностям инверсии. Достоверность определения характеристик дефектов улучшается при более коротких временах наблюдения, при низком значении поперечной диффузии тепла. Например, так называемое «время раннего наблюдения» [46] и время пика второй логарифмической производной [65] позволяют оценивать глубину относительно небольших дефектов даже при одномерном характере теплопередачи. Однако такой подход ограничен малыми амплитудами температурных сигналов и влиянием длительности теплового импульса.

A. Almond и G. Pickering [60] модифицировали одномерную аналитическую модель, чтобы учесть конечный размер дефектов, используя её для предсказания амплитуды и времени пикового контраста для дефектов с различным соотношением сторон. В модели предполагалось, что эффективный коэффициент теплового отражения на границе твёрдое тело - воздух $R=1$, что неверно во многих практических случаях. В работе [66] было продемонстрировано, что величина коэффициента теплового отражения в образце углепластика (CFRP) с искусственными дефектами

в виде отверстий с плоским дном варьируется от 0,18 до 0,84 в зависимости от глубины. Это указывает на то, что реальные дефекты, такие как включения, расслоения, трещины и т.п., должны характеризоваться различными значениями R . Слабая зависимость СХВ от R была продемонстрирована в [66,67] без учёта конечных размеров дефекта. Фактически, модель, предложенная в [66], показывает, что величина R влияет как на амплитуду, так и на время пиковых контрастов, а также на форму кривых изменения температуры и, соответственно, на величину других предложенных СХВ.

Поскольку методы СХВ не полностью подходят для характеристики более глубоких дефектов с низким соотношением размеров и глубины, был разработан метод нелинейной подгонки (наименьших квадратов) [66,68]. Метод включает подгонку экспериментальных изменений температуры под соответствующие теоретические модели с использованием известных инструментов подбора функций. Новый метод нелинейной подгонки, представленный в [66], позволил учесть изменяющиеся значения коэффициента теплового отражения, но не учитывал трёхмерную диффузию тепла, что ограничивает точность определения характеристик дефектов.

В настоящей работе предложен новый метод оценки глубины дефектов с низким отношением размера дефекта к глубине, то есть с учётом явления трёхмерной диффузии тепла. Метод основан на сочетании известной аналитической модели и алгоритма нелинейной подгонки. Эффективность работы метода подтверждена путём проведения как численного моделирования, так и экспериментов на образцах, напечатанных на 3D-принтере, с искусственными дефектами. В отличие от вышеупомянутых подходов, предлагаемая методика учитывает конечный размер дефектов и вводит в рассмотрение эффективный коэффициент теплового отражения (менее единицы), таким образом, принимая во внимание ТФХ как исследуемого материала, так и дефектов, а также геометрию дефектов.

4.1 Теоретические основы и аналитическая модель для определения глубины дефектов малых размеров

Температурный отклик адиабатической пластины толщиной d при импульсном нагреве описывается известным выражением:

$$T(0, t) = \frac{Q_0}{e\sqrt{\pi t}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n e^{-\frac{(nd)^2}{at}} \right], \quad (4.1)$$

где R - коэффициент теплового отражения (контраст тепловой инерции материала и дефекта), n - индекс суммирования. Тогда температурный контраст между дефектной и бездефектной областями может быть представлен как разность температур для полубесконечного тела и пластины конечной толщины путём вычитания уравнения (4.1) из уравнения (1.1):

$$\Delta T(0, t) = \frac{2Q_0}{e\sqrt{\pi t}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} R^n e^{-\frac{(nd)^2}{at}} \right]. \quad (4.2)$$

Чтобы учесть размер дефекта и анизотропию температуропроводности, Almond и Pickering ввели дополнительный член в выражение (4.2), рассматривая грань дефекта как теплоотвод [60]. Выражение для температурного контраста ΔT над центром круглого дефекта было предложено в виде:

$$\Delta T(0, t) = \frac{2Q_0}{e\sqrt{\pi t}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} R^n e^{-\frac{(nd)^2}{at}} \right] \left(1 - e^{-\frac{D^2}{16mat}} \right), \quad (4.3)$$

где D - диаметр дефекта, а m - отношение коэффициентов температуропроводности материала в поперечной плоскости и по толщине. Уравнение (4.2) использовали для определения предела обнаружения скрытых дефектов. Однако в работе [60] предполагалось, что $R=1$ и $n=1$, что на практике не всегда верно [66]. Согласно [66, 67], анализ уравнения (4.2) показывает, что значения R в основном влияют на максимальные температурные сигналы (пиковые контрасты), но не на оптимальное время наблюдения (время пикового контраста t_{peak}). Однако, при использовании уравнения (4.3), изменение коэффициента R также сдвигает положение времени пикового контраста, если учитывать конечный размер дефектов. Это утверждение продемонстрировано на рисунке 4.1, где представлены дифференциальные температурные сигналы ΔT для различных коэффициентов отражения и диаметров дефектов. Поскольку на величины ΔT и t_{peak} влияет трёхмерная диффузия тепла, известные методы определения характеристик дефектов с помощью СХВ могут быть неточными. Поэтому предложено применить метод нелинейной подгонки для согласования экспериментальных данных с аналитическим решением по формуле (4.3).

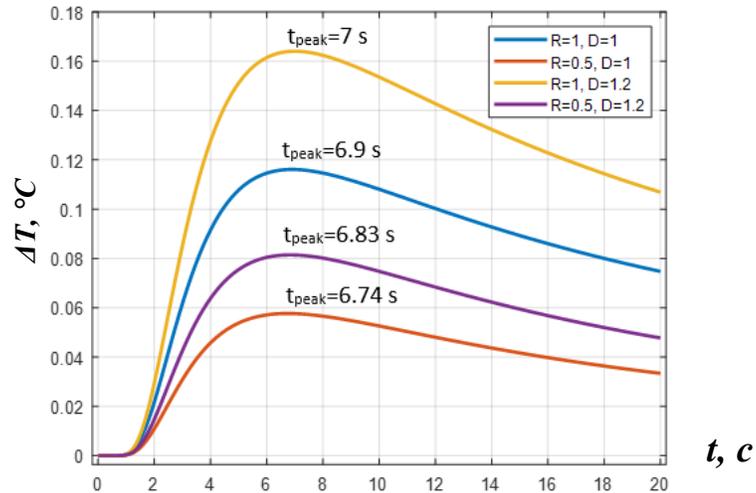


Рисунок 4.1 - Кривые зависимости ΔT от времени для различных значений.

коэффициента теплового отражения R и диаметра дефекта D (полученные по формуле (4.3), $Q_0 = 10\,000$ Дж/м², $e = 538$ Вт·с^{1/2}· м⁻²· К⁻¹, $\alpha = 0,58 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $d = 1$ мм, $m = 1$, $n = 10$)

В работе [60] было показано, что как экспериментальные, так и смоделированные изменения температуры соответствуют величинам, получаемым уравнением (4.3) при нарастающем фронте $\Delta T(t)$, в то время как в более длительные периоды времени имеются расхождения. Поэтому для подгонки был выбран период времени, предшествующий времени пикового контраста.

Напомним, что аналитические модели теплового неразрушающего контроля обычно являются одномерными, т.е. в основном относятся к плоским дефектам большого поперечного размера, ориентированным в параллельном направлении относительно поверхности образца. Фактически, приведённые выше выражения являются приближенными и позволяют скорректировать одномерные аналитические решения с учётом конечного размера дефекта.

При применении техники нелинейной подгонки проблемой также является количество переменных в формуле (4.3). Подгонка многих неизвестных параметров может привести к длительному времени вычислений, ухудшению точности определения характеристик, а также неадекватным решениям из-за множества возможных комбинаций параметров. К счастью, некоторые переменные можно оценить экспериментально. Например, температуропроводность может быть достоверно определена с помощью метода Паркера [69,70]. Поперечный размер дефекта - единственный параметр, который можно оценить визуально по поверхностных температурных аномалий или с помощью некоторых других методов [71]. В то же время оценка теплопроводности и теплоёмкости требует измерения поглощённой энергии, что затруднительно без использования специального оборудования. Согласно формуле (1.1), эти два параметра

появляются вместе, и их можно заменить так называемой кажущейся тепловой инерцией [72], которую можно найти экспериментально по формуле 1.6.

Таким образом, только два неизвестных параметра становятся кандидатами на подгонку: глубина дефекта d и эффективный коэффициент теплового отражения R . Тогда предлагаемая модель описывается следующей формулой:

$$\Delta\bar{T}(R, d, D, e_{app}, \alpha, t) = \frac{2}{e_{app}\sqrt{\pi t}} \left[\sum_{n=1}^M R^n e^{-\frac{(nd)^2}{at}} \right] \left(1 - e^{-\frac{D^2}{16mat}} \right), \quad (4.4)$$

где M - количество итераций. В данном исследовании было принято $M = 10$, поскольку более высокие члены суммирования оказались незначительными. Как упоминалось выше, подгонка была выполнена в диапазоне времени $0 < t < t_{peak}$, где t_{peak} - время пикового контраста. Алгоритм нелинейной подгонки использовал функцию Matlab основанную на методе наименьших квадратов «*lsqnonlin*» для решения задачи оптимизации с пятью параметрами. Три параметра D , e_{app} и α были оценены независимо на основе экспериментальных данных и введены в алгоритм в пределах соответствующих интервалов $\pm 10\%$. Процедура подгонки сформулирована следующим образом:

$$\min_{R, d, D, e_{app}, \alpha} \left\| \Delta\bar{T}(t) - \Delta T(t) \right\|, \quad (4.5)$$

где $\Delta T(t) = T_d - T_{nd}$ - экспериментальный температурный контраст между центрами дефектов и соседними бездефектными областями. Значения R варьировались от -1 до 1 при исходном значении 1, а диапазон глубины дефекта d составлял 0,1-10 мм (исходное значение 1 мм).

4.2 Численное моделирование

Численное моделирование использовали для демонстрации эффективности предложенной аналитической модели и алгоритма нелинейной подгонки для определения глубины дефекта в случаях, когда трёхмерная диффузия тепла оказывает значительное влияние (низкое соотношение размер/глубина дефекта), то есть в тех случаях, когда алгоритмы, основанные на одномерных моделях, проявляют низкую достоверность определения характеристик дефектов. Кроме того, была проверена применимость модели для дефектов различной формы, таких как отверстия с

плоским дном, диск и сфера, путём изменения коэффициента теплового отражения R . Результаты численного моделирования также сравнивались с результатами определения характеристик глубины с применением известного метода термографической реконструкции сигнала (TSR) или метода второй производной по времени, который, как предполагается, меньше подвержен влиянию трёхмерных диффузионных явлений, чем методы СХВ [49].

Численное моделирование проводили с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics. Модель рассчитывала процесс трёхмерной теплопередачи в сплошном блоке ($5 \times 5 \times 20$, $10 \times 10 \times 20$ и $15 \times 15 \times 20$ мм) с воздушным дефектом внутри. Были проанализированы различные формы дефектов, такие как отверстие с плоским дном, диск и сфера. Для всех типов дефектов были рассмотрены три диаметра дефекта D (1, 3 и 5 мм) и три глубины, соответствующие соотношениям размер/глубина 5, 2 и 1. Глубина определялась как расстояние от передней поверхности образца до верхней границы дефекта. Пример тепловой модели показан на рисунке 4.2.

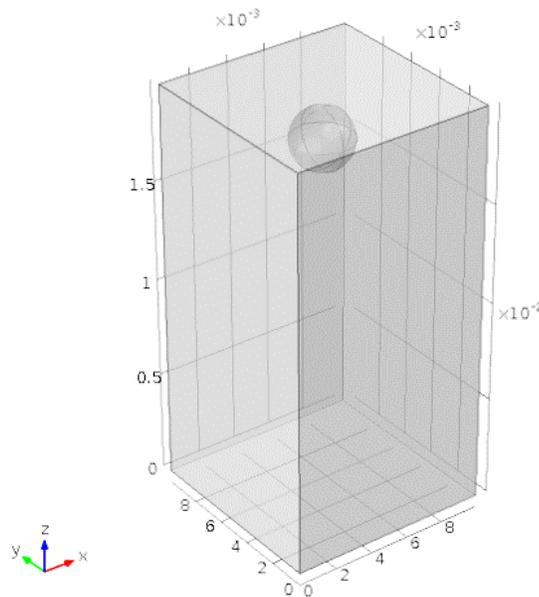


Рисунок 4.2 - Вид модели в интерфейсе Comsol Multiphysics

Импульсный тепловой поток (плотность мощности 100 кВт/м^2 , длительность $0,1 \text{ с}$) подводили к верхней (передней) поверхности образца, причём остальная поверхность пластины была адиабатической. Материалом блока был полимер на основе полилактида (ПЛА), а значения ТФХ были заимствованы из опубликованных данных [73] (ПЛА) и библиотеки Comsol Multiphysics (воздух), см. Таблицу 4.1.

Таблица 4.1. ТФХ материалов, используемых в модели Comsol Multiphysics.

Параметр	ПЛА	Воздух
Удельная теплоёмкость (Дж/(кг·К))	1800	1066
Теплопроводность (Вт/(м·К))	0.13	0.024
Плотность (кг/м ³)	1240	1.276

Сетка конечных элементов содержала от 10 372 до 38 597 элементов в форме тетраэдра (больше элементов для более мелких дефектов). Средний размер каждого элемента 2 мм; однако на верхней поверхности располагался пограничный слой с элементами толщиной около 0,1–0,3 мм. Примеры использованных сеток для различных типов дефектов показаны на рисунке 4.3. В расчётах использовался стандартный временной шаг 0,05 с. Результаты моделирования были представлены в виде изменения температуры в поверхностных и недефектных точках с интервалом времени 0,05 с (рисунок 4.2). Модель включала физический интерфейс «Теплообмен в твёрдых телах» и так называемый «решатель», зависящий от времени (time-dependent solver).

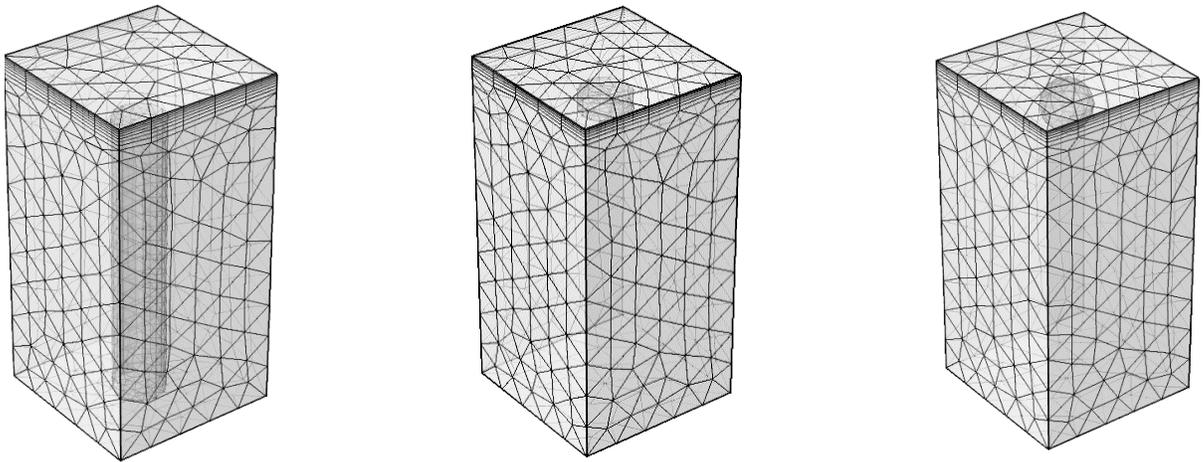


Рисунок 4.3 - Примеры конечно-элементной сетки в Comsol Multiphysics (слева направо: отверстие с плоским дном, диск, сфера).

4.3 Экспериментальная установка и образцы

Технологии 3D печати позволяют изготавливать образцы сложной геометрии, включая дефекты, такие как пустоты, включения, пузырьки воздуха и т.п. Девять образцов из ПЛА размером 60 мм×60 мм×20 мм с дефектами трёх типов (отверстия с плоским дном, диск и сфера) с различным поперечным размером и глубиной были напечатаны для экспериментов по ТК. Пример образца, содержащего девять сферических дефектов диаметром 3 мм, показан на рисунке 4.4, а параметры всех сферических искусственных дефектов перечислены в таблице 4.2. Заметим, что глубина дефекта определяется как расстояние от верхней поверхности образца до верхней точки дефекта. Дополнительно был изготовлен бездефектный образец размером 60 мм×60 мм×2 мм для оценки температуропроводности ПЛА.

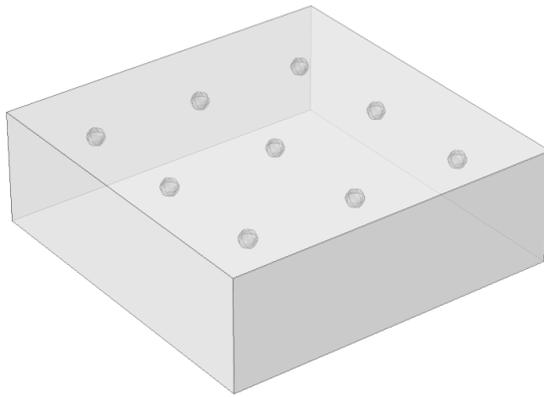


Рисунок 4.4 - Схема образца со сферическими дефектами ($D=3$ мм).

Таблица 4.2. Сферические дефекты в образцах ПЛА, напечатанных на 3D-принтере.

Глубина d (мм)		
$D = 1$ мм	$D = 3$ мм	$D = 5$ мм
0.3	0.6	1.5
0.45	0.9	1.8
0.6	1.2	2.1
0.75	1.35	2.25
0.9	1.5	2.4
1.05	1.65	2.55
1.2	1.8	2.7
1.35	2.1	3
1.5	2.4	3.3

Экспериментальная установка включала ИК тепловизор FLIR SC7650 и импульсную лампу Hensel EH Pro 6000 (энергия оптического импульса 6 кДж, длительность импульса 6 мс, расстояние до образца 385 мм). Отражатель импульсной лампы закрывали защитным стеклом для исключения паразитного ИК-излучения. Последовательности изображений, состоящие из 2500 ИК-термограмм (формат изображения 320×256), были получены с частотой сбора данных 50 Гц и временем интегрирования 1,432 мс. Схемы односторонней (режим отражения) и двухсторонней (режим пропускания) процедур ТК представлены на рисунке 4.5 (установку, показанную на рисунке 4.5 б, использовали для определения коэффициента температуропроводности).

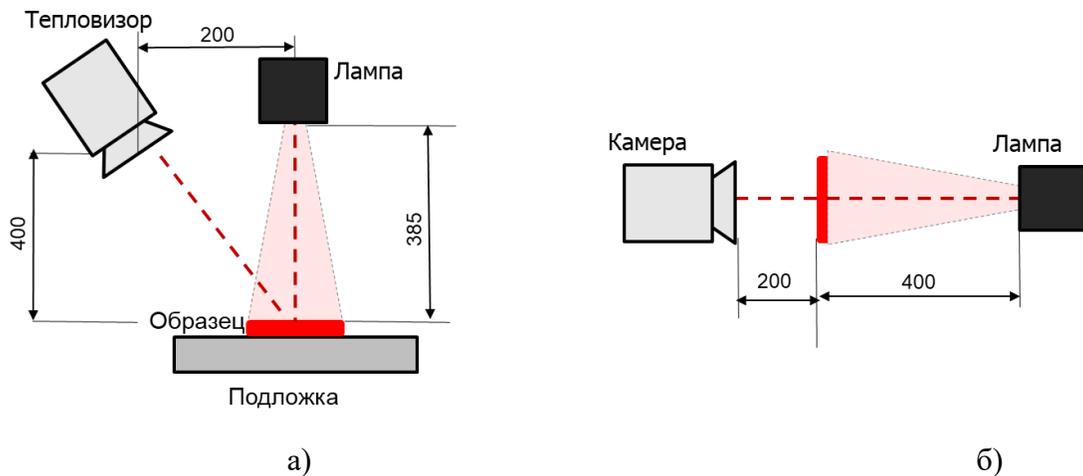


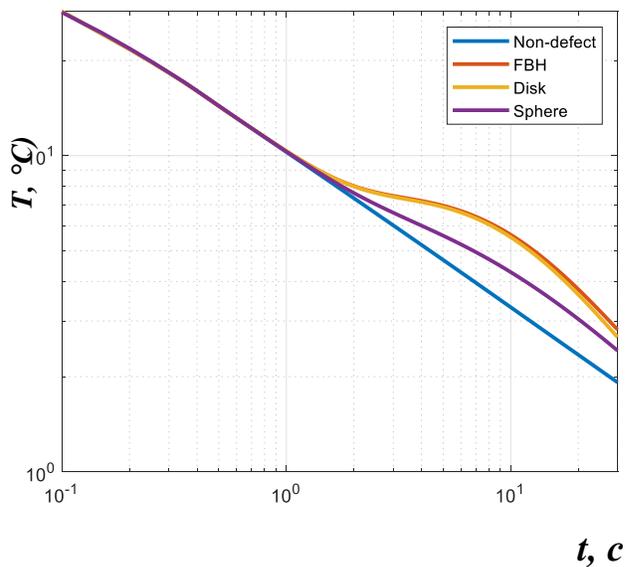
Рисунок 4.5 - Процедуры теплового неразрушающего контроля: (а) режим отражения, (б) режим пропускания.

Время вспышки было синхронизировано с записанными кадрами, как рекомендовано в [74]. Перед включением лампы было записано десять предварительных кадров, и их среднее значение вычиталось из каждого изображения в записанных последовательностях, чтобы в дальнейшем обрабатывать только изображения избыточной температуры образца. Таким образом, анализируемые последовательности ИК-изображений соответствовали только стадии охлаждения образца, начиная с максимальной температуры, которая имеет место в конце импульса. Обработку ИК термограмм выполняли с помощью программного обеспечения LabIR (Университет Западной Богемии), а расчёты производных, кажущейся тепловой инерции и поперечных размеров дефекта выполняли с помощью программного обеспечения ThermoFit Pro

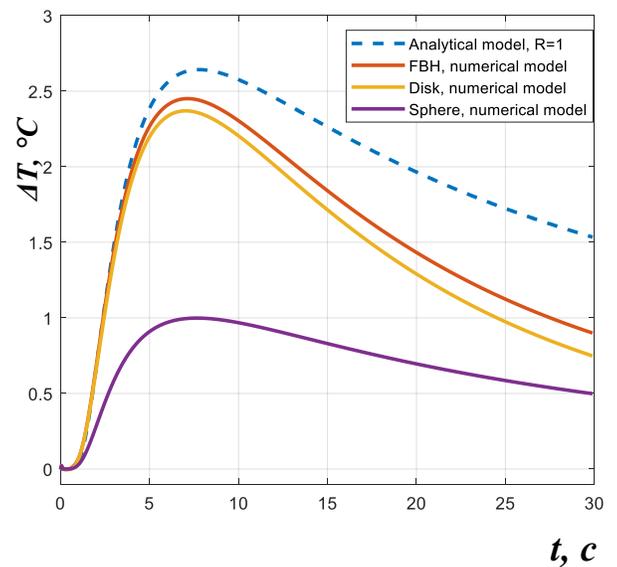
(Томский политехнический университет). Используемый алгоритм нелинейной подгонки был реализован на платформе Matlab.

4.4 Результаты численного моделирования

На рисунке 4.6 а показаны результаты численного моделирования для трёх типов дефектов (отверстие с плоским дном, диск и сфера) с одинаковым диаметром ($D=3$ мм) и глубиной ($d=0,6$ мм). Изменение температуры в бездефектных областях соответствует аналитическому решению для полубесконечного тела с такими же тепловыми свойствами и представляет собой прямую линию с наклоном $-0,5$ в логарифмическом масштабе. В зоне дефектов графики изменения температуры отклоняются от прямой линии, причём отклонения различны для различных форм дефектов (рисунок 4.6 а). Эта особенность становится более наглядной на кривых, отражающих температурные контрасты: $\Delta T(t) = T_d(t) - T_{nd}(t)$; см. рисунок 4.6 б. На рисунке 4.6 б также показано сравнение численных и аналитических (по уравнению 4.3) значений $\Delta T(t)$, полученных для идентичных условий испытаний; заметим, что коэффициент теплового отражения $R = 1$.



(a)



(б)

Рисунок 4.6 - Графики изменения температуры в логарифмическом масштабе (а) и температурные контрасты ΔT (б) для отверстия с плоским дном, диска и сферы ($D = 3$ мм и $d = 0,6$ мм), полученные путём численного моделирования.

Рисунок 4.6 демонстрирует, что, дефекты одного размера, но различной формы не могут характеризоваться одинаковой величиной пикового контраста ΔT_{max} и временем пикового контраста t_{peak} , независимо от того, рассчитываются ли параметры контроля численно или аналитически (уравнением 4.3) в случае, если коэффициент теплового отражения принят $R=1$. Предполагалось, что результаты моделирования могут быть улучшены путём подбора значений $R < 1$ и более точной оценки «эффективных» глубин дефектов. На рисунке 4.7 показано применение алгоритма нелинейной подгонки к числовым данным. Глубина дефекта d и коэффициент теплового отражения R были заданы как неизвестные параметры, подлежащие подгонке. Значения D , e_{app} и a задавали такими же, как в численной модели. Как упоминалось выше, анализировали только возрастающие участки сигналов $\Delta T(t)$, т.е. интервалы времени $0 < t < t_{peak}$, которые определяли индивидуально для каждой кривой температурного контраста $\Delta T(t)$.

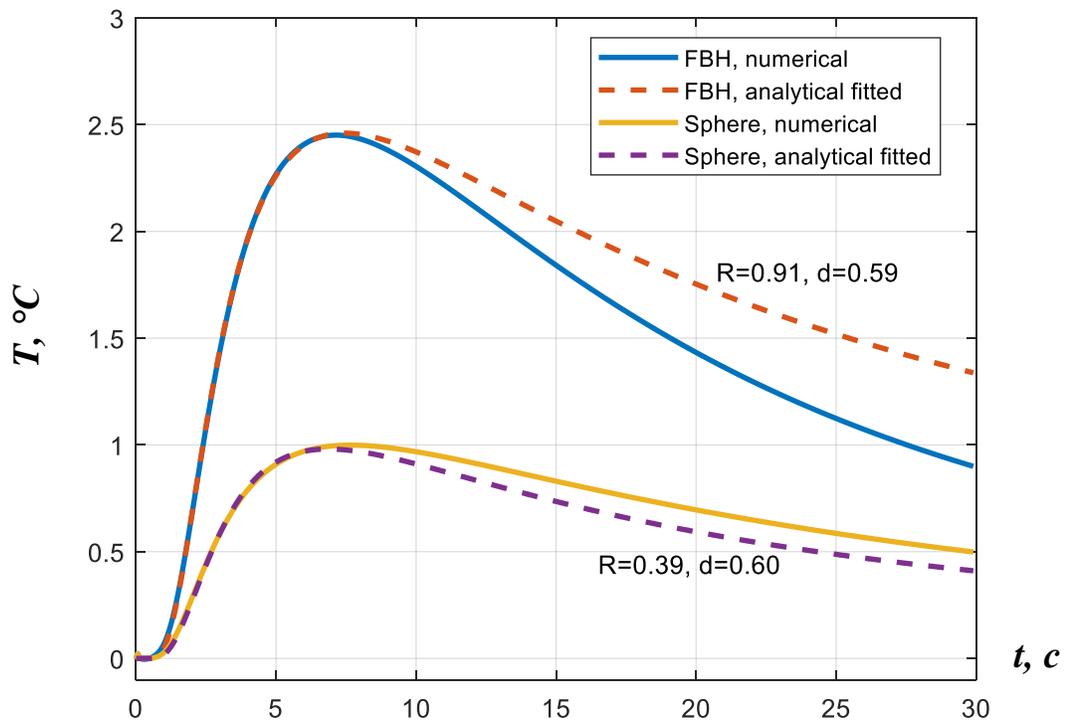


Рисунок 4.7 - Изменение температурных контрастов ΔT для отверстий с плоским дном и сфер с $D=3$ мм и $d=0,6$ мм, полученные путём численного и аналитического моделирования с подобранными параметрами d и R

Было установлено, что в рассматриваемом временном интервале аналитическая модель весьма удовлетворительно согласуется с численными данными. Значения глубины, предсказанные алгоритмом, сравнивали с результатами, полученными методом второй производной по времени (термографическая реконструкция сигнала – TSR), которые были применены к результатам численного моделирования. Метод TSR был выбран для сравнения, поскольку на него слабо влияет трёхмерная теплопроводность и он пригоден для оценки дефектов с низким соотношением размеров сторон к глубине [57]. Результаты сравнения представлены в Приложении А. Однако предложенный алгоритм нелинейной подгонки, который учитывает размер дефекта и тепловое отражение на границах дефекта, продемонстрировал более точные результаты прогнозирования характеристик дефекта по сравнению с методом TSR. Следует отметить, что подобранные значения R варьировались не только в зависимости от формы дефекта, но также и от глубины и диаметра дефекта. В целом, коэффициент теплового отражения возрастал с увеличением глубины и диаметра дефекта. Соответственно, значения R в случае отверстий с плоским дном и дискообразных дефектов ($R=0,7-1$) были выше, чем для сфер ($R=0,3-0,6$), хотя и наблюдались некоторые отклонения от этого результата. Фактически, предложенная модель ТК упрощена и не полностью отражает сложность трёхмерной диффузии тепла в дефектах. Кроме того, стоит заметить, что значения R , полученные при подгонке, не представляют истинные значения теплового отражения между двумя материалами, потому что на них влияет трёхмерная теплопроводность. В целом, представленные выше результаты иллюстрируют эффективность предлагаемого подхода для прогнозирования глубины дефекта в случае низкого коэффициента пропорциональности дефекта. На рисунке 4.8 показана средняя относительная ошибка оценки глубины дефекта M для анализируемых дефектов с различными соотношениями сторон, полученной методами TSR и нелинейной подгонки. Здесь M определяется как:

$$M = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \left| \frac{d_t - d_p}{d_t} \right| \times 100\% \quad (4.6)$$

где d_t и d_p - истинная и определяемая глубина дефекта, а $m=3$ - количество измерений, соответствующих трём диаметрам дефектов с одинаковым соотношением сторон.

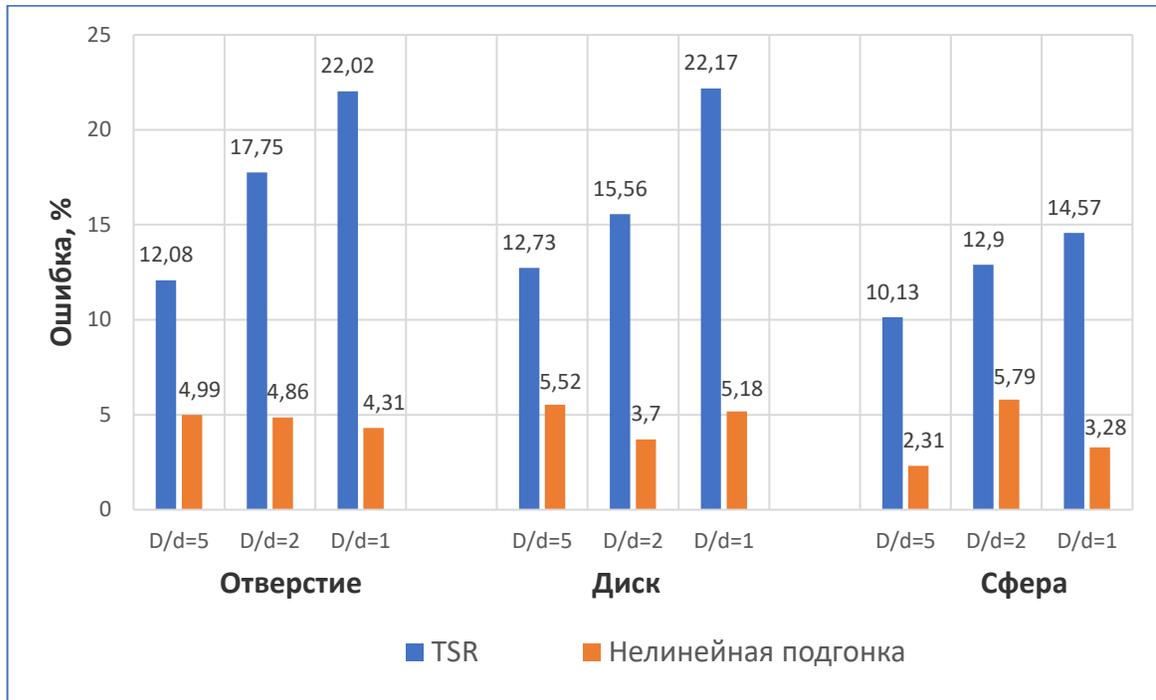


Рисунок 4.8 - Средние относительные ошибки оценки глубины с использованием методов TSR и нелинейной подгонки к аналитической модели

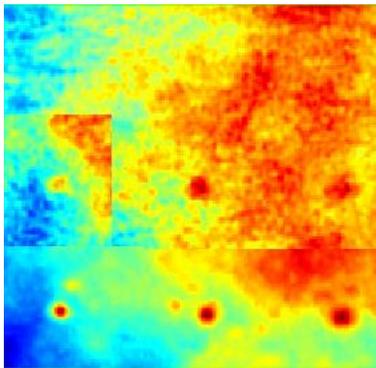
Максимальные относительные ошибки прогноза глубины методом нелинейной подгонки составили около 12% и 11% соответственно для дисковых дефектов и отверстий с плоским дном ($D=1$ мм, $d=0,2$ мм). Фактически, такие ошибки ожидалось из-за влияния конечной длительности теплового импульса, что особенно важно для мелких дефектов. Однако в большинстве случаев ошибки не превышали $\pm 5\text{--}6\%$ без заметного увеличения для дефектов с более высоким соотношением сторон (рисунок 4.8). Это означает, что предложенный алгоритм учитывает поперечный размер дефектов и может быть реализован для оценки более мелких дефектов. В свою очередь, относительная ошибка при использовании метода TSR была значительно выше по сравнению с методом нелинейной подгонки, и она растёт со снижением соотношения сторон дефекта. Стоит отметить, что метод TSR всегда давал отрицательные ошибки (Приложение А), т.е. прогнозируемая глубина дефекта всегда была ниже истинных значений глубины.

Результаты численного моделирования подтверждают справедливость предложенной ранее аналитической модели, учитывающей трёхмерные явления теплопроводности, которые возникают в зонах дефектов. Показано, что, в отличие от предыдущих исследований, коэффициент теплового отражения R нельзя принимать равным 1. Модель также полезна при расчёте температурных откликов от сферических дефектов. В этом случае восстановленные

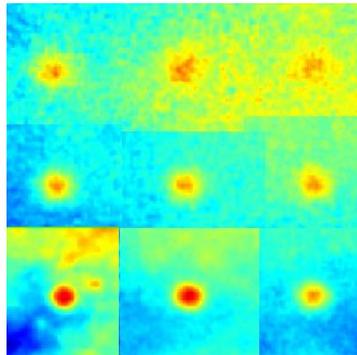
значения R ниже, чем в случае плоских дефектов. В целом, использование метода нелинейной подгонки в сочетании с аналитической моделью кажется более эффективным при определении глубины дефекта, если его сравнивать с часто рекомендуемым методом TSR.

4.5 Экспериментальные результаты

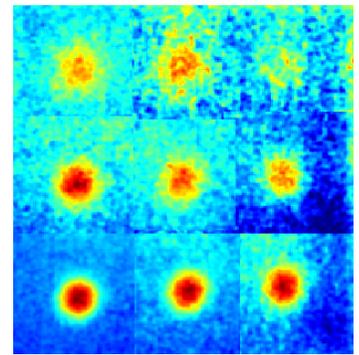
Результаты экспериментов показали достаточно хорошую «обнаруживаемость» всех типов дефектов. Максимальные глубины надёжно обнаруживаемых дефектов составили 1,05; 2,4 и 3 мм для дефектов диаметром 1, 3 и 5 мм соответственно. На рисунке 4.9 показаны синтетические термограммы, полученные путём сшивания интересующих областей для отдельных дефектов, которые характеризуются различным оптимальным временем наблюдения, как показано на рисунке 4.7. На тепловой карте на рисунке 4.9 каждый дефект вырезан из соответствующего необработанного «оптимального» изображения для демонстрации максимальных температурных контрастов в одном изображении.



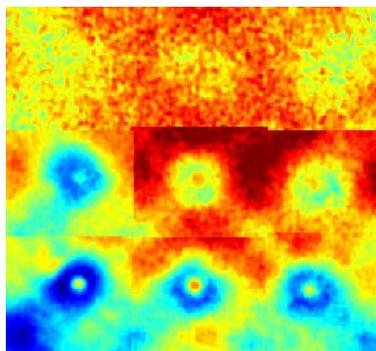
(a)



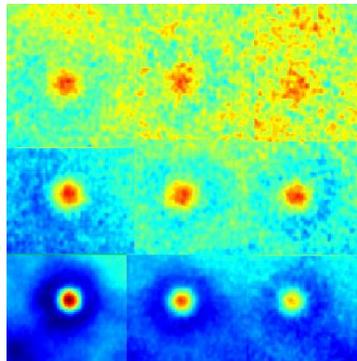
(б)



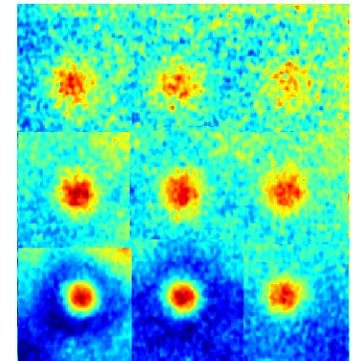
(в)



(г)



(д)



(е)

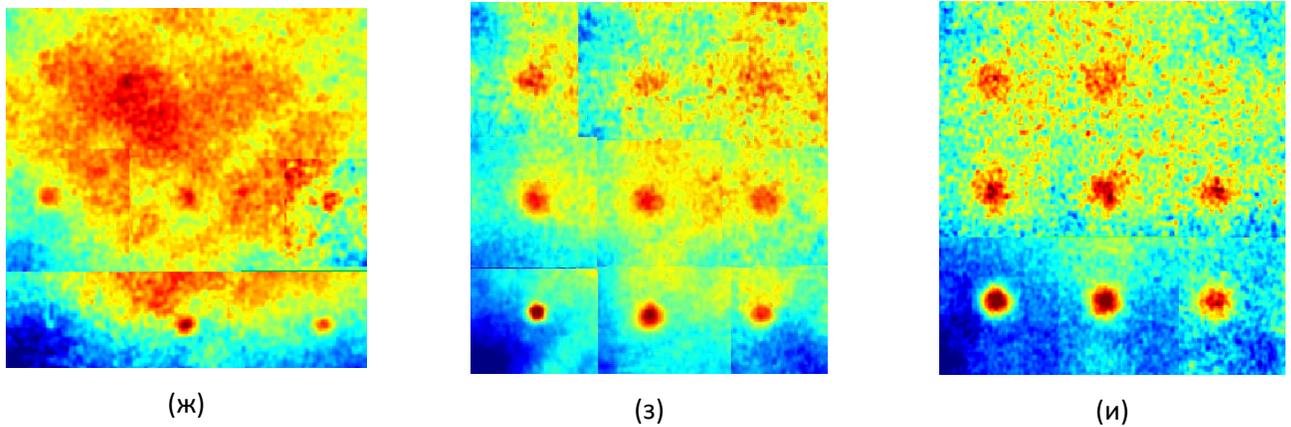


Рисунок 4.9 - Синтетические ИК термограммы испытанных образцов: (а) отверстия с плоским дном, $D=1$ мм, (б) отверстия, $D=3$ мм, (в) отверстия, $D=5$ мм, (г) диск, $D=1$ мм, (д) диск, $D=3$ мм, (е) диск, $D=5$ мм, (ж) сфера, $D=1$ мм, (з) сфера, $D=3$ мм, (и) сфера, $D=5$ мм.

Поскольку методология, использованная в этом исследовании, основана на анализе эволюции ΔT , необходимо идентифицировать как дефектные, так и бездефектные области. Для подавления однопиксельных всплесков сигнала были выбраны области размером 2×2 пикселя в центрах индикации дефектов, а во избежание влияния неравномерного нагрева рядом с каждым анализируемым дефектом были выбраны бездефектные области размером 10×10 пикселей.

Как отмечалось выше, использование метода нелинейной подгонки требует априорных знаний температуропроводности материала, кажущейся тепловой инерции и поперечного размера дефекта.

Температуропроводность определяли методом Паркера на бездефектном образце размером $60 \text{ мм} \times 60 \text{ мм} \times 2 \text{ мм}$ [69]. Материал образца считали изотропным, принимая коэффициент анизотропии $m = 1$. Найденная величина коэффициента температуропроводности, усреднённая по измерениям в десяти точках и использованная в расчётах, составила $1,04 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Кажущаяся тепловая инерция была вычислена путём применения уравнения (1.6) к экспериментальным значениям температуры, что позволило получить последовательности карт кажущейся тепловой инерции. Поскольку кажущаяся тепловая инерция зависит от поглощённой энергии Q_0 , в расчётах учитывалась только её величина в выбранных эталонных областях. Для адиабатического полубесконечного тела, нагретого импульсом Дирака, аналитическая функция «кажущейся тепловой инерции в зависимости от времени» представляет собой прямую линию, параллельную оси x . Однако соответствующие экспериментальные функции искажаются

влиянием длительности теплового импульса и поверхностных тепловых потерь, а также пространственными/временными шумами различного происхождения. Поэтому в этом исследовании кажущаяся тепловая инерция была принята как среднее значение в выбранной эталонной области в интервале времени 3–20 с, где на полученные значения слабо влияют длительность импульса и тепловые потери. На рисунке 4.10 показано изменение теоретической и экспериментальной кажущейся тепловой инерции во времени (интервал времени 3–20 с, отверстие с плоским дном, $D=3$ мм, $d=0,6$ мм).

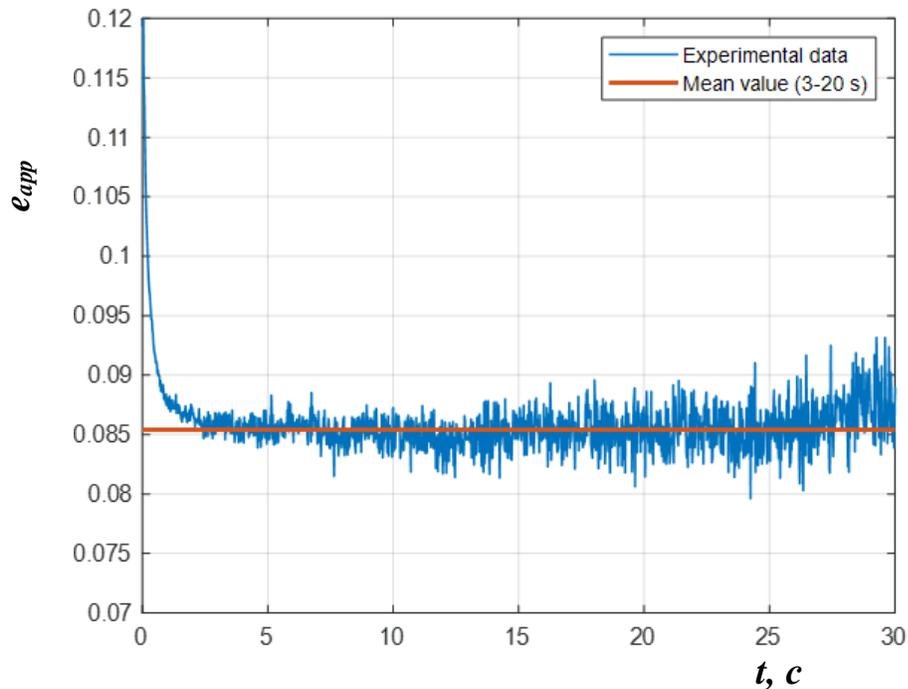
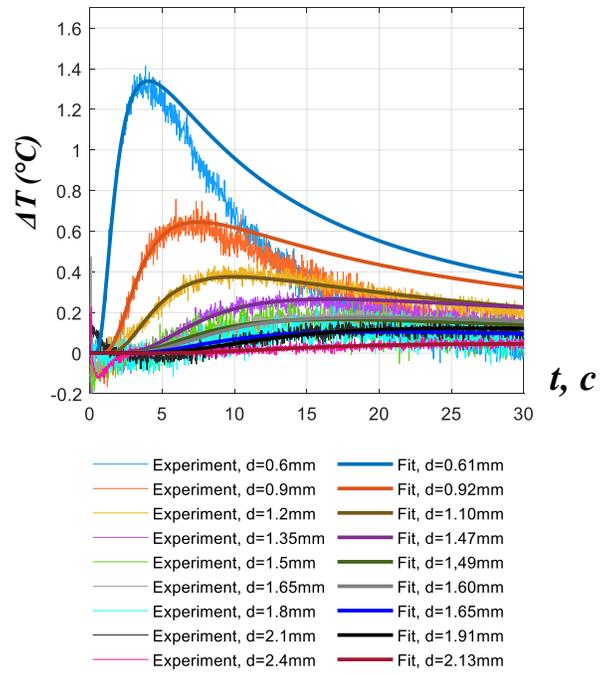
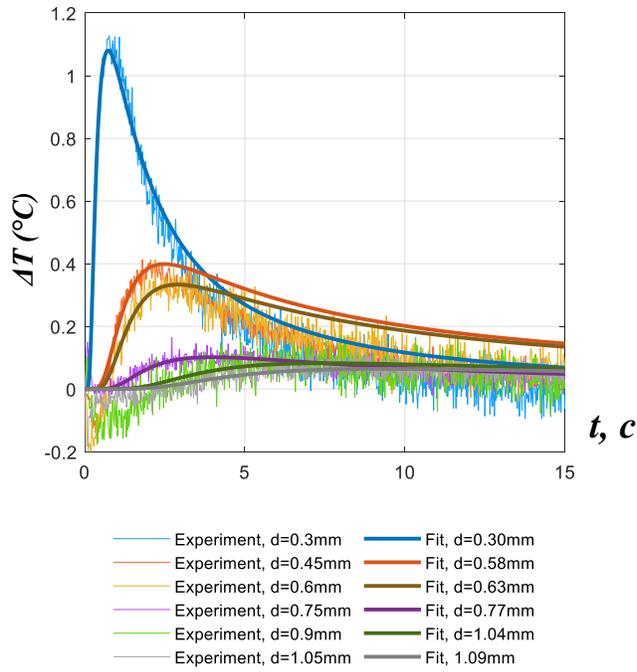


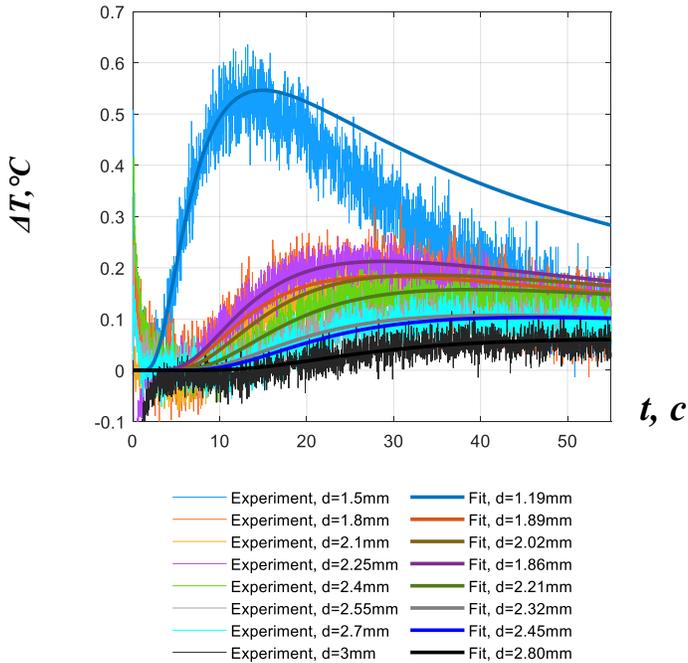
Рисунок 4.10 - Зависимость кажущейся тепловой инерции от времени (образец ПЛА).

Обзор методов определения поперечного размера дефекта выходит за рамки данной работы; см. [75, 76]. В этом исследовании истинные размеры дефектов использовали в качестве средних значений в алгоритме нелинейной подгонки в пределах интервала $\pm 10\%$.

На рисунке 4.11 показаны кривые температурного контраста (ΔT), полученные из экспериментальных данных для каждого дефекта, вместе с соответствующими аналитически подобранными кривыми, полученными с применением алгоритма нелинейной подгонки.

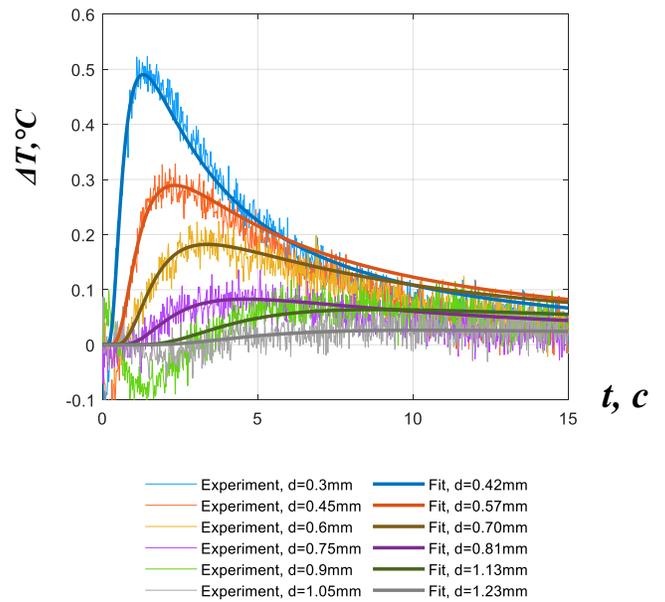


Отверстие, $D = 1$ мм

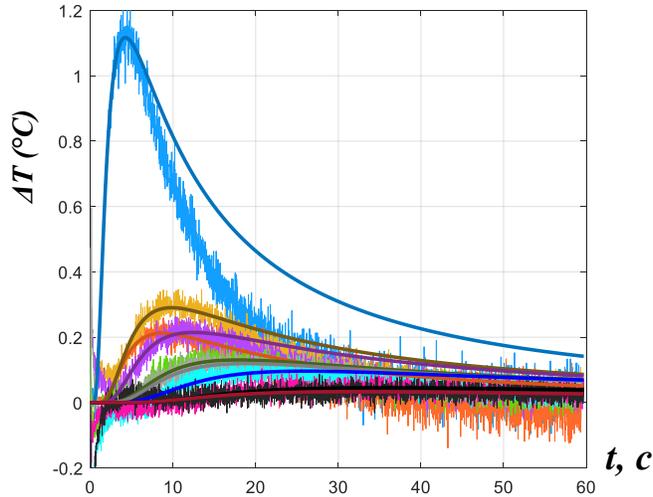


Отверстие, $D = 5$ мм

Отверстие, $D = 3$ мм

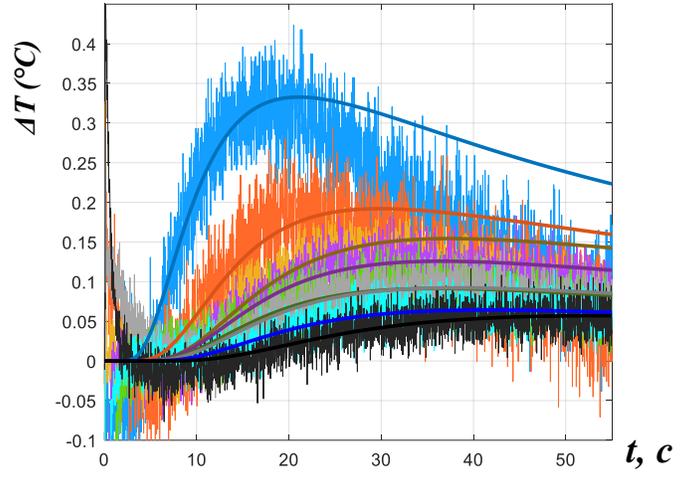


Диск, $D = 1$ мм



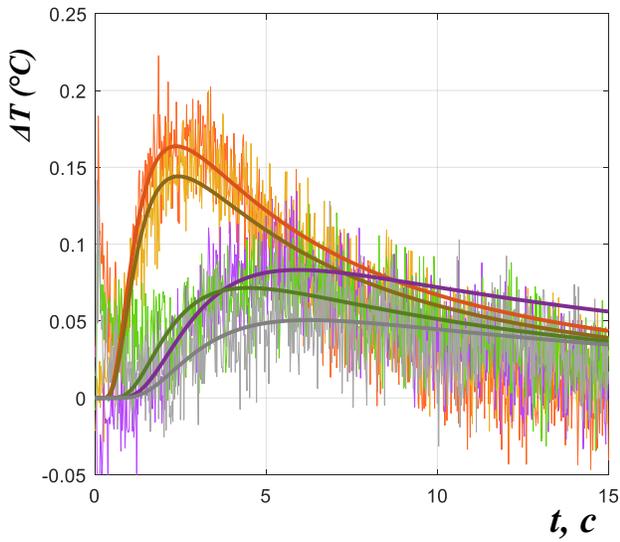
- | | |
|----------------------|---------------|
| Experiment, d=0.6mm | Fit, d=0.65mm |
| Experiment, d=0.9mm | Fit, d=1.02mm |
| Experiment, d=1.2mm | Fit, d=1.10mm |
| Experiment, d=1.35mm | Fit, d=1.28mm |
| Experiment, d=1.5mm | Fit, d=1.56mm |
| Experiment, d=1.65mm | Fit, d=1.60mm |
| Experiment, d=1.8mm | Fit, d=1.90mm |
| Experiment, d=2.1mm | Fit, d=2.22mm |
| Experiment, d=2.4mm | Fit, d=2.13mm |

Диск, $D = 3$ мм



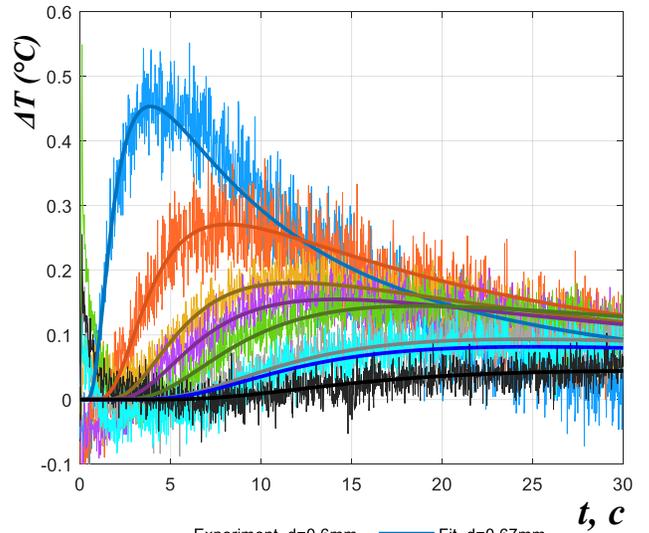
- | | |
|----------------------|---------------|
| Experiment, d=1.5mm | Fit, d=1.57mm |
| Experiment, d=1.8mm | Fit, d=1.99mm |
| Experiment, d=2.1mm | Fit, d=2.12mm |
| Experiment, d=2.25mm | Fit, d=2.16mm |
| Experiment, d=2.4mm | Fit, d=2.20mm |
| Experiment, d=2.55mm | Fit, d=2.25mm |
| Experiment, d=2.7mm | Fit, d=2.38mm |
| Experiment, d=3mm | Fit, d=2.70mm |

Диск, $D = 5$ мм



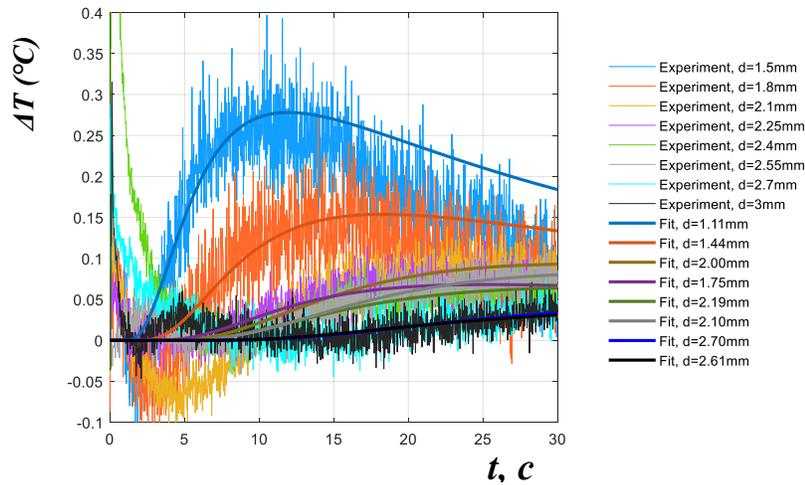
- | | |
|----------------------|---------------|
| Experiment, d=0.45mm | Fit, d=0.58mm |
| Experiment, d=0.6mm | Fit, d=0.62mm |
| Experiment, d=0.75mm | Fit, d=0.92mm |
| Experiment, d=0.9mm | Fit, d=0.84mm |
| Experiment, d=1.05mm | Fit, d=1.00mm |

Сфера, $D = 1$ мм



- | | |
|----------------------|---------------|
| Experiment, d=0.6mm | Fit, d=0.67mm |
| Experiment, d=0.9mm | Fit, d=1.14mm |
| Experiment, d=1.2mm | Fit, d=1.26mm |
| Experiment, d=1.35mm | Fit, d=1.37mm |
| Experiment, d=1.5mm | Fit, d=1.59mm |
| Experiment, d=1.65mm | Fit, d=1.85mm |
| Experiment, d=1.8mm | Fit, d=1.86mm |
| Experiment, d=2.1mm | Fit, d=2.17mm |

Сфера, $D = 3$ мм



Сфера, $D = 5$ мм

Рисунок 4.11 - Экспериментальный и аппроксимированный температурный контраст ΔT

Из рисунка 4.11 следует, что качество согласования экспериментальных данных с теоретической моделью было довольно высоким, а предложенный алгоритм дефектометрии, применённый к экспериментальным результатам, оказался более эффективным по сравнению с алгоритмом второй производной; см. данные в Приложении Б. На рисунке 4.12 показано сравнение средних относительных ошибок M оценки глубины с использованием обоих методов. В большинстве случаев метод нелинейной подгонки давал относительные ошибки прогноза глубины менее 15%, хотя в некоторых случаях они достигали 25–40%, что, вероятно, было связано с несовершенствами материала и погрешностями 3D печати. В случае алгоритма TSR ошибки дефектометрии составляли 30–50%, а максимальные оценённые глубины были ниже, поскольку на некоторых экспериментальных температурных кривых не было отчётливых пиков производной. Например, максимальная расчётная глубина для отверстий с плоским дном ($D=3$ мм) составила 1,65 мм для метода TSR и 2,4 мм для метода нелинейной подгонки.

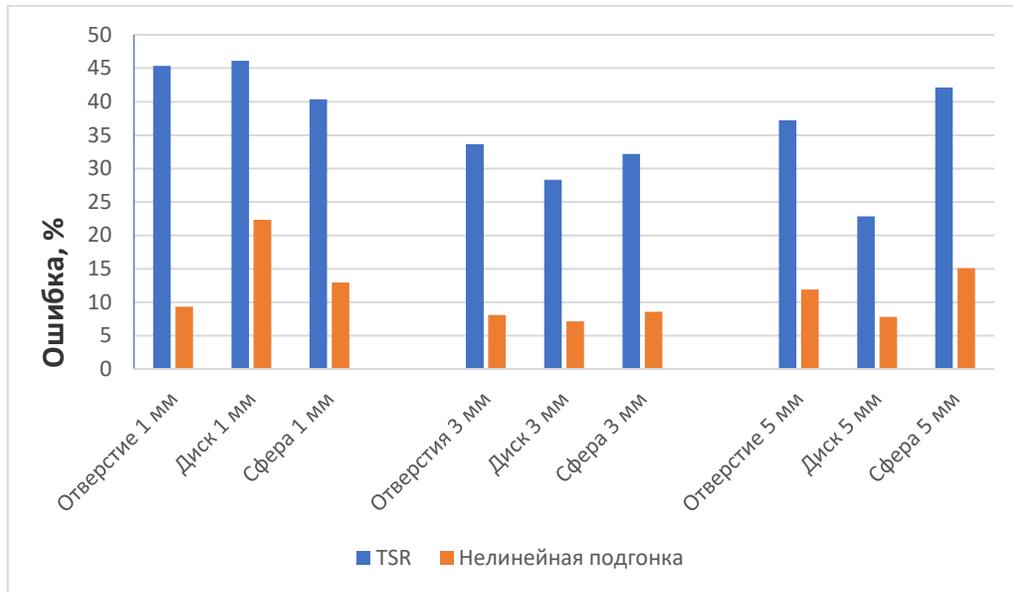


Рисунок 4.12 - Средние относительные ошибки оценки глубины с использованием методов TSR и нелинейной подгонки (эксперимент)

Результаты дефектометрии с использованием методов нелинейной подгонки и TSR в приложении к экспериментальным данным представлены в Приложении Б.

4.6 Выводы по Главе 4

В данной главе представлен новый метод определения глубины дефекта при импульсном тепловом неразрушающем контроле. Метод основан на сочетании известной упрощённой 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 величину кажущейся тепловой инерции материала, причём параметры подгонки определяли экспериментально. Было установлено, что модель обеспечивает хорошую корреляцию численных и экспериментальных данных во временном диапазоне, соответствующем фронту температурного контраста $0 < t < t_{peak}$. Этот интервал времени переходного теплового процесса определяет эффективность применения алгоритма. Экспериментальное определение величин кажущейся тепловой инерции, температуропроводности и диаметра дефектов известными методами позволило сократить число неизвестных в задаче оптимизации до двух.

Возможности дефектометрии данного метода были проанализированы на результатах численного моделирования и экспериментального ТК образцов, изготовленных методом аддитивных технологий, которые содержали дефекты в виде отверстий с плоским дном, дисков и сфер трёх различных диаметров, размещённых на различной глубине. Результаты численного моделирования продемонстрировали хорошее согласование между аналитической и численной моделями в рекомендованном временном интервале. Максимальные относительные ошибки дефектометрии методом нелинейной подгонки, при применении к данным моделирования, составили около 5% и 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 часто рекомендуемого метода TSR находится в диапазоне 10–22%, причём большие значения наблюдались для дефектов с низким соотношением 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.

Величина относительной ошибки определения глубины реальных 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 отчётливых пиков производной. Например, расчётная глубина для отверстий с плоским дном ($D=3$ мм) составила 1,65 мм для метода TSR и 2,4 мм для метода нелинейной подгонки.

Недостатком предложенной методики является зависимость результатов от неравномерности нагрева, что требует выбора оптимального бездефектного участка. Кроме того, результаты дефектометрии зависят от степени приближения ТФХ модели к параметрам реального изделия, а именно, теплопроводности материала, кажущейся тепловой инерции и поперечного размера дефекта.

Глава 5. Разработка метода оценки толщины покрытий на основании пороговой отсечки кажущейся тепловой инерции

Покрытие - это защитный слой, который наносят на поверхность материалов для защиты от внешних воздействий. Различные виды покрытий широко используют для восстановления и увеличения срока службы металлических и композитных конструкций, защищая их от коррозии, износа или теплового воздействия [77,78]. Покрытия различаются по назначению, материалам и методам нанесения. Толщина покрытия - важный параметр, используемый для оценки качества покрытия и срока службы. Поэтому методы неразрушающего контроля, позволяющие определять толщину покрытия, необходимы при производстве и эксплуатации материалов с покрытиями.

Преимущества и недостатки применения ИК термографии для оценки толщины покрытий в сравнении с другими методами НК (вихретоковый, ультразвуковой, рентгеновский и т.д.) аналогичны другим задачам НК и были рассмотрены ранее. Было предложено множество процедур ИК-термографических испытаний и алгоритмов обработки данных для оценки толщины покрытий [79]. Методы теплового контраста [80] требуют выбора контрольной точки (области), что типично для обнаружения дефектов, но является проблемой при количественном определении толщины покрытий. Методы импульсно-фазовой термографии и тепловых волн позволяют найти корреляцию между фазой Фурье и толщиной покрытия, но соответствующие зависимости сложны и не универсальны (например, нужно применять полином четвёртой степени для сглаживания данных) [81]. Анализ второй логарифмической производной [82] (TSR), является чувствительным и выявляет чёткую зависимость времени пика производной от толщины. Однако наличие шума и необходимость применения полиномиальной аппроксимации, а также конечная длительность нагрева, могут повлиять на точное определение максимумов производной или даже добавить «ложные» пики в эволюцию производной. Типичные алгоритмы обработки были сравнительно проанализированы в работах [74, 83]. Однако соответствующие алгоритмы часто являются времезатратными или не основываются на чётких физических моделях. Кроме того, на результаты применения этих алгоритмов может влиять ряд внешних факторов и шумы.

В данной главе диссертации показана возможность применение метода кажущейся тепловой инерции (рассмотренного ранее) для оценки толщины покрытий. В отличие от подходов, описанных в [44,70,72,84], где метод кажущейся тепловой инерции использовали для обнаружения дефектов и измерения тепловых характеристик материалов. В данной работе

предложено применять этот метод для количественной оценки толщины покрытий. Для этого предлагается использовать пороговое значение кажущейся тепловой инерции, которое является промежуточным значением между тепловой инерцией покрытия и подложки.

Наиболее важным ограничением этого метода является тот факт, что тепловая инерция подложек и покрытий должна различаться в достаточной степени, чтобы иметь чёткий переходный процесс между измеренными коэффициентами кажущейся тепловой инерции двух слоёв. Однако это является типичным требованием для процедур теплового неразрушающего контроля в целом. Диапазон измеряемых толщин ограничен влиянием конечного теплового импульса с одной стороны и тепловыми потерями с другой. В данной работе метод измерения толщины продемонстрирован на покрытиях из Cr13%Fe, изготовленных методом термического напыления с толщиной в диапазоне 0,1–1,1 мм. Анализ ограничений и работоспособности предложенного метода для других типов покрытий/поверхностных структур, в частности, толстых и низкотеплопроводных, требует дальнейших исследований.

5.1 Теоретические основы метода

Концепция метода кажущейся тепловой инерции представлена в разделе 1.2.2. Суть данного метода при определении толщины покрытий заключается в том, что для однослойного материала (в идеальном случае) график изменения кажущейся тепловой инерции (формула 1.6) представляет собой прямую линию. Для двухслойного материала график сначала принимает значение тепловой инерции первого слоя, затем, после переходного процесса значение стремится к значению тепловой инерции второго слоя (рисунок 5.1).

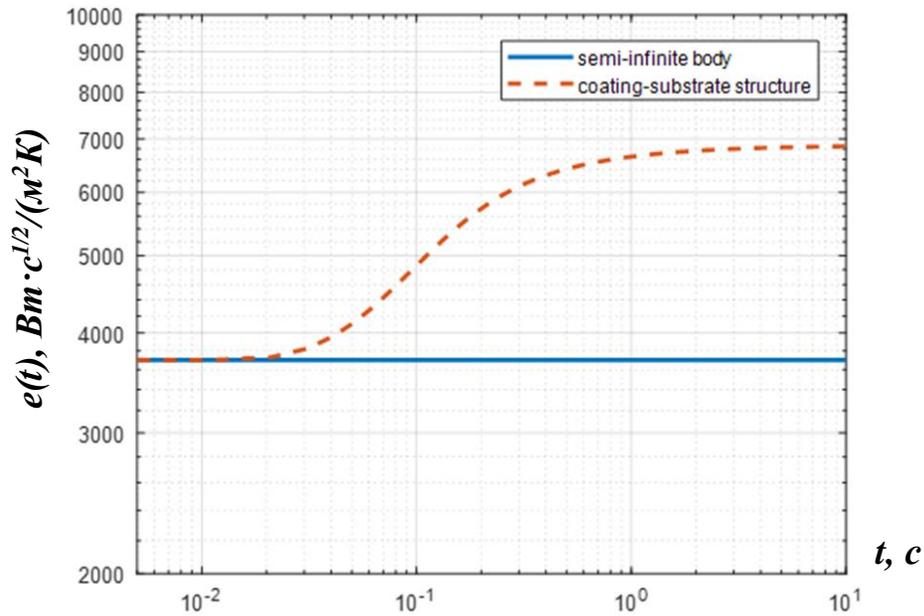


Рисунок 5.1 - График кажущейся тепловой инерции для однослойного и двухслойного материала (формула 1.5).

Точка перегиба на графике $e(t)$ зависит от толщины первого слоя и соотношения тепловых свойств покрытия и подложки. Следовательно, толщину покрытия можно оценить путём анализа соответствующих точек перегиба. Соотношение кажущейся тепловой инерции $e_{app}(t)$ покрытия и подложки в моменты стабилизации теплового процесса (при равной поглощённой энергии) аналогично соотношению истинной тепловой инерции материалов. Также стоит отметить, что реальные экспериментальные данные подвержены влиянию конечной длительности импульса нагрева и тепловым потерям, из-за чего реальные графики тепловой инерции искажаются и отходят от формы горизонтальной линии. Однако общий принцип перехода от значений тепловой инерции покрытия к значению подложки сохраняется.

Определение точек перегиба по реальным экспериментальным данным бывает затруднительно из-за наличия шумов, влияния длительности теплового импульса и паразитного отражённого излучения. В работах [72, 84] было продемонстрировано, что изменение толщины покрытия приводит к простому сдвигу кривой тепловой инерции по оси времени (в логарифмических координатах). Следовательно, кажущаяся тепловая инерция для любой структуры покрытие-подложка (рисунок 5.1) пересекает конкретное значение между значениями тепловой инерции покрытия и подложки, в то время как изменения толщины покрытия сдвигают момент времени этого пересечения. В настоящей работе предлагается использовать так

называемое пороговое время t_t . Такое пороговое время соответствует точке, где кривая кажущейся тепловой инерции пересекает конкретное пороговое значение, находящееся между значениями тепловой инерции покрытия и подложки. Значения t_t и их отношение к толщине покрытия можно определить экспериментально или путём моделирования конкретных тестовых ситуаций.

5.2 Полуаналитическая модели для верификации метода

Моделирование проводили с помощью программы Thermix-Analytic-3L (Томский политехнический университет). Программа реализует одномерное полу-аналитическое решение для нагрева трёхслойной неадиабатической пластины прямоугольным импульсом с использованием метода тепловых квадрупольей, описанного в [51]. Модель представляла собой двухслойный образец, нагреваемый прямоугольным импульсом длительностью 6 мс с плотностью теплового потока $1,6 \cdot 10^6$ Вт/м² (рисунок 5.2). Межслойные граничные условия включали непрерывность граничных температур и тепловых потоков, а начальная температура тела была принята нулевой. Коэффициенты теплообмена h как на передней, так и на задней поверхностях, составляли стандартную рекомендуемую величину 10 Вт·м⁻²·К⁻¹. Тепловые свойства покрытия и подложки представлены в таблице 5.1 (усреднённые по литературным данным). Семь значений толщины покрытия соответствовали использованным экспериментальным образцам. Результат расчёта представляет собой изменение температуры на поверхности с шагом по времени 0,001 с (всего до 3000 кадров).

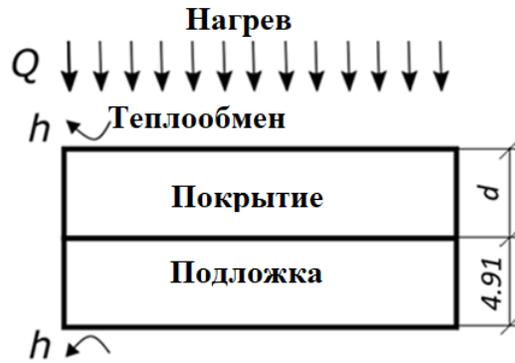


Рисунок 5.2 - Схема модели.

Таблица 5.1 - ТФХ материалов, используемых при моделировании.

Параметр	Покрытие	Подложка *
Толщина d , мм	0.117, 0.266, 0.347, 0.470, 0.679, 0.949, 1.038	4.91
Теплопроводность, Вт·м·К ⁻¹	6.12	40
Температуропроводность, м ² с ⁻¹	2.74×10^{-6}	1.11×10^{-5}
Тепловая инерция, Вт·с ^{1/2} м ⁻² К ⁻¹	0.37×10^4	1.21×10^4

* Сталь S235

5.3 Экспериментальная установка и образцы

Два экспериментальных образца размером 70×25 мм представляли собой стальную подложку толщиной 4,91 мм с покрытиями из Cr13%Fe, полученными методом термического напыления [85]. Эта технология основана на дуговой плавке двух порошковых проволок, подаваемых в систему. Покрытия Cr13%Fe, полученные по технологии термического напыления, характеризуются высокой неоднородностью, высокой пористостью и оксидными включениями [86]. Ожидаемая теплопроводность такого покрытия составляет от 2 до 10 Вт·м⁻¹·К⁻¹ [86]. Подложка была изготовлена из конструкционной стали S235, теплопроводность которой была в диапазоне от 40 до 50 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Ожидалось, что комбинация материалов с указанными выше ТФХ и толщиной покрытия от 0,1 до 1 мм должна обеспечивать обнаруживаемые температурные сигналы при применении импульсной ИК-термографии [87].

Схема образцов представлена на рисунке 5.3. Первый образец содержал четыре области покрытия толщиной 0,117 (d1), 0,266 (d2), 0,347 (d3) и 0,470 (d4) мм. Соответственно, второй

образец содержал четыре участка покрытия толщиной 0,679 (d5), 0,949 (d6), 1,004 (d7) и 1,038 (d8) мм. Поперечные размеры покрытых участков составляли 18×25 мм.

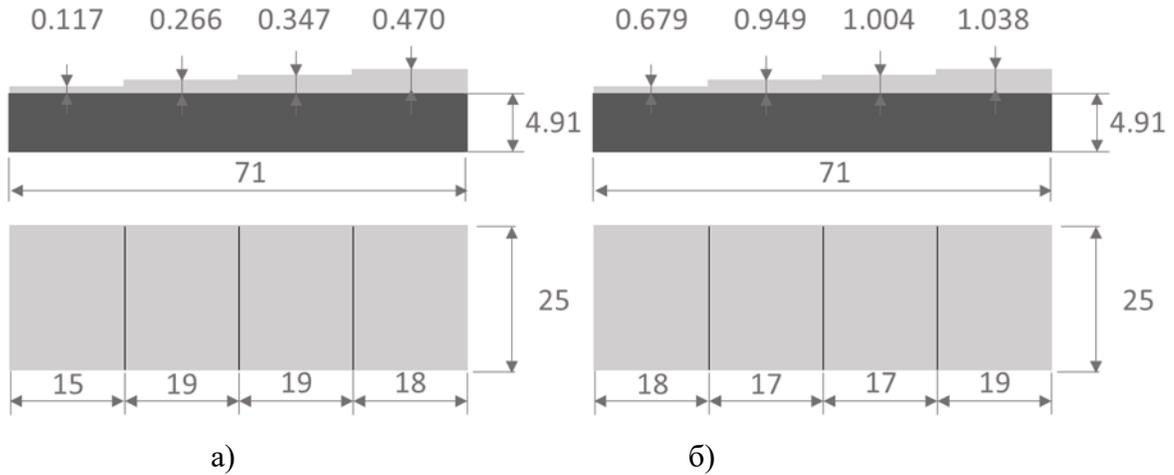


Рисунок 5.3 - Схема образцов 1 (а) и 2 (б).

Поверхность покрытий оставалась в состоянии после напыления без какой-либо дополнительной обработки. Таким образом, образцы были сравнительно шероховатыми, что создавало некоторую неопределённость при измерении толщины покрытия.

Для измерения толщины и верификации результатов был произведён продольный разрез образцов. Измерение толщины проводили при помощи микроскопа в 10 точках для каждого диапазона толщины. Далее учитывали средние значения. На рисунке 5.4 показано микроскопическое изображение разреза образца на участке со средней толщиной покрытия 1.038 мм.

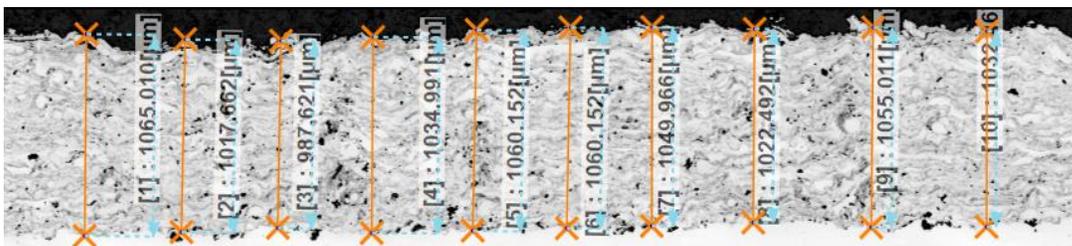


Рисунок 5.4 - Измерение толщины покрытия при помощи микроскопа (среднее значение 1,038 мм)

Нагрев образцов производили с помощью импульсной установки Hensel EH Pro 6000, обеспечивающий оптический импульс длительностью 6 мс и мощностью до 6 кДж. ИК-термограммы были записаны тепловизором FLIR A6751 с частотой кадров 400 Гц (2000 кадров изображений в последовательности). Поскольку образцы были небольшими, влияние неравномерного нагрева было незначительным и не учитывалось.

Перед дальнейшей обработкой ко всем ИК-термограммам в записанной последовательности применяли вычитание фона и медианный фильтр с пространственной маской 3×3 пикселя.

5.4 Результаты моделирования

Расчётные изменения температуры и тепловой инерции представлены на рисунке 5.5. Пунктирные линии представляют собой аналитические графики изменения температуры полубесконечного тела из материалов покрытия и подложки соответственно после приложения импульса Дирака (уравнение 1.1). Сплошными линиями представлены результаты аналитического моделирования для покрытий различной толщины. Существует определённое несоответствие между температурой полубесконечного тела и смоделированным изменением температуры в начале и в конце теплового процесса. Это вызвано конечной продолжительностью теплового импульса и теплообменом с окружающей средой. Кривые тепловой инерции на рисунке 5.5 (б) были получены путём применения уравнения (1.5) к температурным данным, представленным на рисунке 5.5 (а). Для чистого покрытия и чистой подложки эволюция тепловой инерции $e(t)$ стремится к истинному значению тепловой инерции, с вышеупомянутыми отклонениями в начале и в конце процесса. Таким образом, для определения тепловой инерции следует использовать только ограниченный участок соответствующих кривых, на котором наблюдается плато. Этот участок проиллюстрирован на рисунке 5.5 (б) (интервал 0,1–0,4 с), где кривые тепловой инерции покрытия и подложки соответствуют их истинным значениям (пунктирные линии).

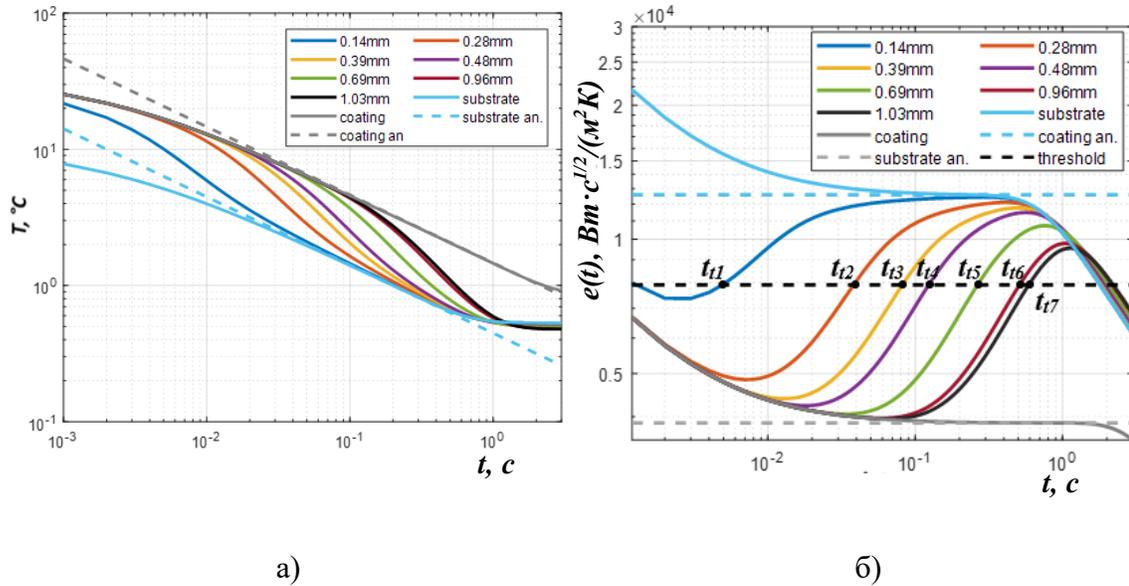


Рисунок 5.5 - Определение тепловой инерции для данных моделирования: изменение температуры (а) и тепловой инерции (б).

Эволюция тепловой инерции структуры покрытие-подложка сначала следует кривой тепловой инерции покрытия, а затем стремится к величине тепловой инерции подложки. Однако, на рисунке 5.5 (б) видно, что кривые не достигают истинной величины тепловой инерции подложки, полученной для полубесконечного тела. Для определения глубины покрытия можно использовать определённое пороговое значение тепловой инерции в диапазоне между величинами для подложки и покрытия. Рисунок 5.6 показывает, что существует линейная зависимость между толщиной покрытия и квадратным корнем из времени пересечения порогового значения тепловой инерции. Таким образом, можно использовать любой порог из вышеупомянутого диапазона. В данном случае было использовано пороговое значение:

$$e_t = (e_c + e_s)/2, \quad (5.1)$$

величина которого составила $e_t = 0,79 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Соответствующие пороговые времена могут быть получены как момент пересечения линии порога и кривых тепловой инерции. (см. $t_{t1} - t_{t7}$ на рисунке 5.5 (б)).

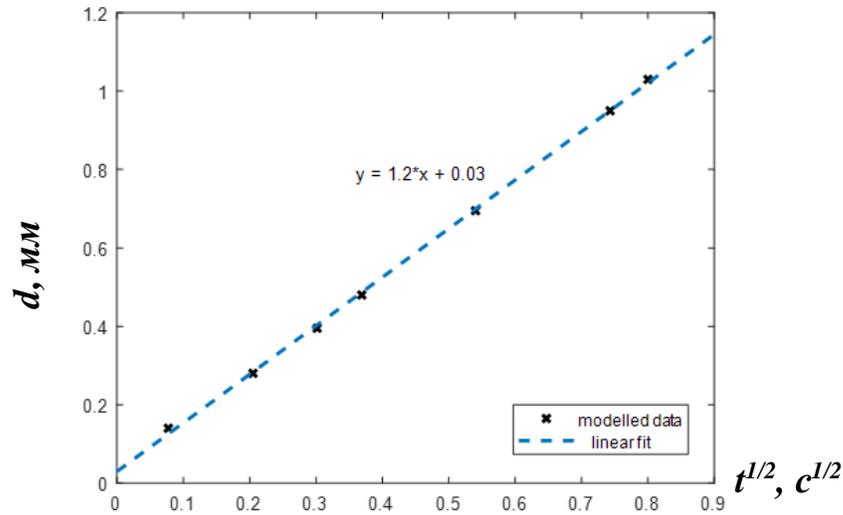


Рисунок 5.6 - Квадратный корень из порогового времени в зависимости от толщины покрытия (моделирование)

Результат моделирования иллюстрирует основную концепцию определения толщины покрытия на основе оценки порога тепловой инерции и порогового времени. Соответствующая линейная зависимость может использоваться для определения как толщины покрытия, так и её вариаций. Оптимальный порог тепловой инерции может быть найден аналитически по известным ТФХ материалов. Однако в реальных экспериментах ТФХ материала, а также подводимая энергия, обычно неизвестны. Тогда порог тепловой инерции может быть оценён экспериментально с использованием стандартных образцов и соответствующей процедуры калибровки. Экспериментальные графики $e(t)$ (уравнение (1.5)) могут быть заменены значениями кажущейся тепловой инерции $e_{app}(t)$ (уравнение (1.6)), которые не требуют информации о поглощённой энергии.

5.5 Экспериментальные результаты

Графики изменения температуры T_1-T_8 (рисунок 5.7 (а)) были усреднены маской 50×50 пикселей в каждой области покрытия d_1-d_8 и обработаны с применением уравнения (1.6) для расчёта эволюции кажущейся тепловой инерции, представленной на рисунке 5.7 (б). Полученные кривые показывают, что, в отличие от результатов моделирования (рисунок 5.5), экспериментально определённые значения кажущейся тепловой инерции увеличиваются от более

низких до более высоких значений в начале процесса, когда соответствующие аналитические кривые падают. Это означает, что температура снижается быстрее, чем прогнозировалось при моделировании в начале теплового процесса (примерно до 0,03 с), вероятно, из-за вклада отражённого излучения в измеряемый температурный сигнал, который должен резко уменьшиться после вспышки. Следует заметить, что результаты эксперимента и моделирования сближаются примерно через 0,03 с.

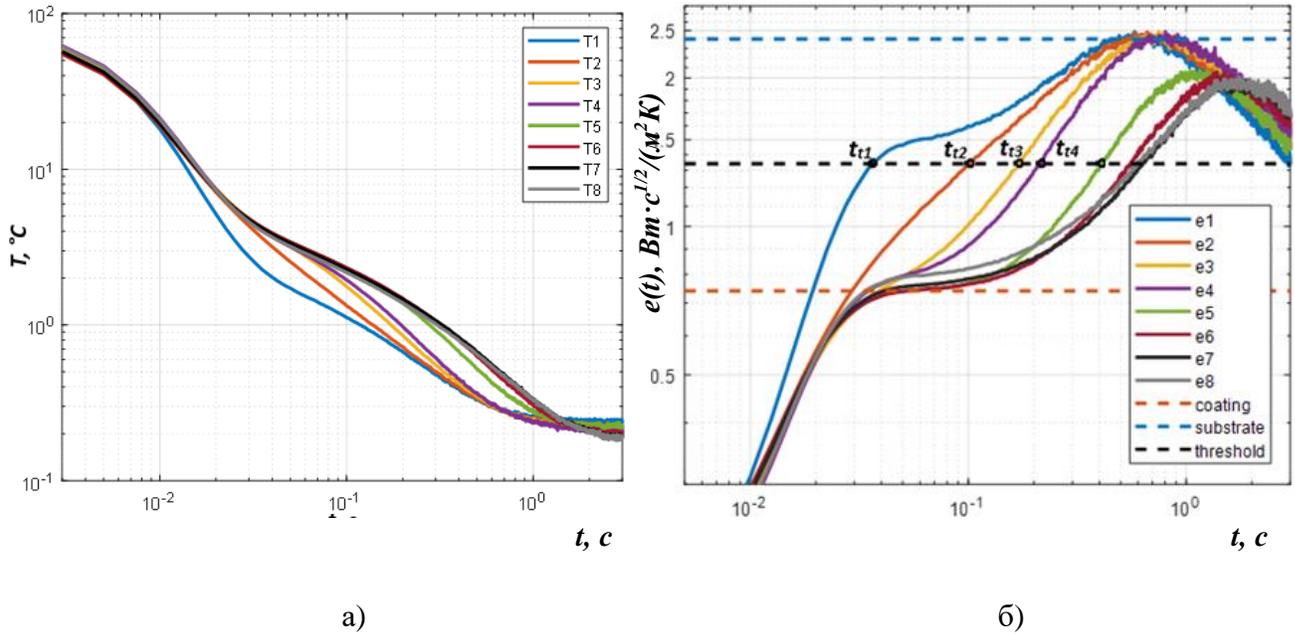


Рисунок 5.7 - Экспериментальные данные изменения температуры (а) и кажущейся тепловой инерции (б) для стального образца с покрытием Fe13%Cr (рисунок 5.2).

Предполагаемые значения кажущейся тепловой инерции покрытия и подложки были определены как значения плато на рисунке 7 б (пунктирные линии). Из-за наличия шумов и того факта, что кривые e_5 – e_8 не доходят до значения плато, определение порога кажущейся тепловой инерции по формуле 5.1 приводило к ошибкам. Оптимальные пороговые значения были получены методом проб и ошибок в следующем виде:

$$e_t = \exp\left(\frac{\ln e_{app c} + \ln e_{app s}}{2}\right) \quad (5.2)$$

На рисунке 5.8 показана зависимость квадратного корня из порогового времени от толщины покрытия с пороговым значением кажущейся тепловой инерции $1,34 \text{ (K}^{-1}\text{s}^{-1/2}\text{)}$, полученным с помощью уравнения (5.2).

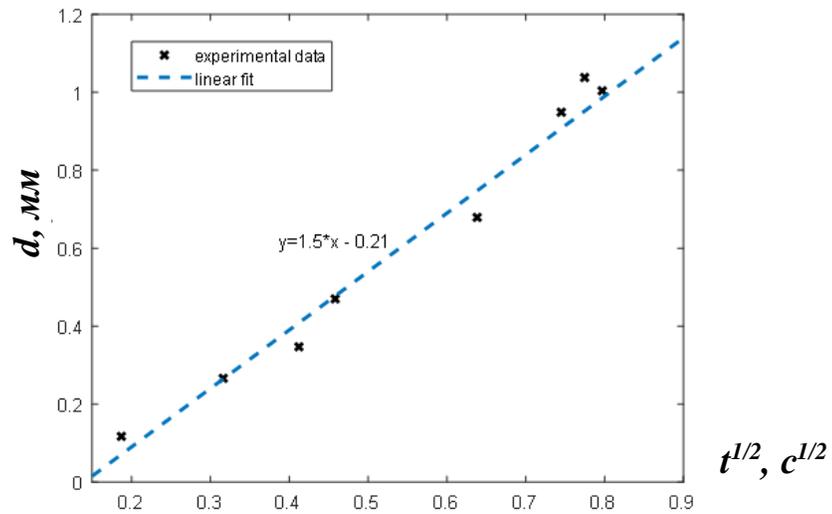


Рисунок 5.8 - Экспериментальная зависимость корня квадратного из порогового времени от толщины покрытия.

На основе линейной регрессии данных с рисунка 5.8 зависимость толщины покрытия от порогового времени была получена в виде:

$$d = 1.5\sqrt{t_t} - 0.21 \quad (5.3)$$

Стандартное отклонение приведённой выше регрессии составляет $\sigma = 36,68$ мкм. Уравнение (5.3) представляет собой линейную калибровочную функцию с коэффициентами, зависящими от тепловых свойств покрытий и подложек, а также от выбранного порога кажущейся тепловой инерции. Вышеупомянутая процедура позволяет определить калибровочные отношения для любого эталонного образца и получить соответствующую карту толщины покрытия с использованием соответствующего преобразования исходных данных температуры. Этот подход проиллюстрирован на рисунке 5.9. Дополнительно, примеры карт толщины покрытия в образцах 1 ($d = 117, 266, 347$ и 470 мкм) и 2 ($d = 679, 949, 1004, 1038$ мкм) показаны на рисунке 5.10 в трёхмерной визуализации.

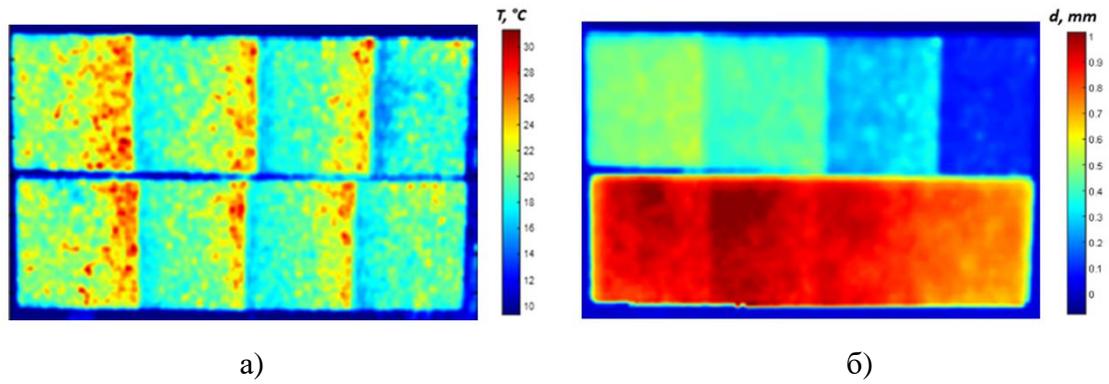
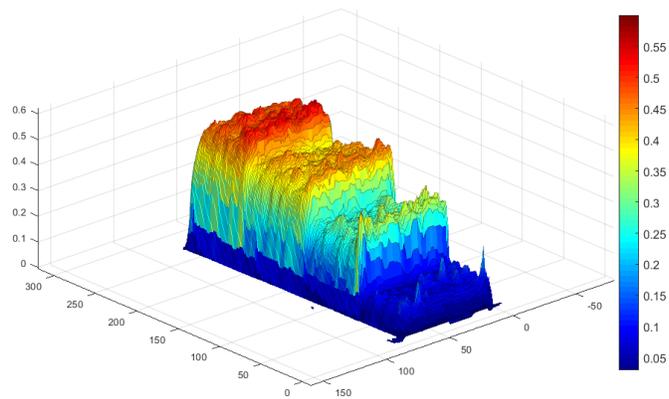
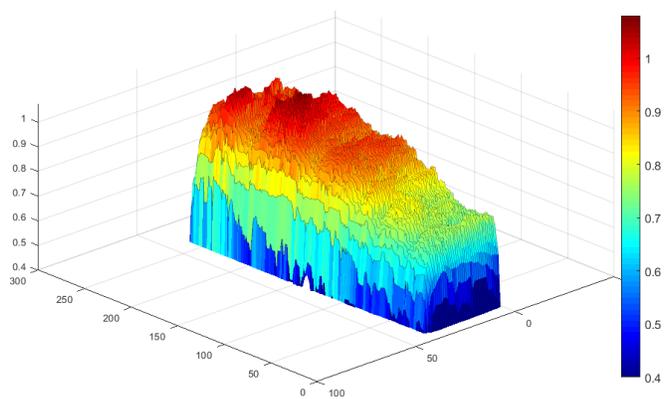


Рисунок 5.9 - Необработанная ИК-термограмма через 10 мс после вспышки (а) и карта толщины покрытия (б).



а)



б)

Рисунок 5.10 - Трёхмерные визуализации карт толщины покрытия образца 1 (а) и образца 2 (б).

Предлагаемый подход также может быть полезен при оценке вариаций толщины покрытия. Таблица 5.2 содержит максимальные, минимальные и средние значения толщины покрытия в областях $d_1 - d_8$, а также соответствующие абсолютные и относительные ошибки и стандартные отклонения, полученные как микрометрическими, так и термографическими измерениями. Микрометрические данные были усреднены по 10 измерениям, в то время как результаты ИК термографии были получены в пределах областей 50×50 пикселей. Максимальная относительная погрешность (20,5%) соответствовала минимальной толщине, а максимальная абсолютная разница (119 мкм) проявлялась в самом толстом покрытии. Поскольку процедура расчёта основана на линейной подгонке микрометрических измерений, расхождение в результатах следует за отклонениями между экспериментальными данными и линейной регрессией (рисунок 5.8). Заметим, что микрометрию проводили в отдельных точках, в то время как ИК термография дала результаты по всей поверхности, на которую влияли неоднородные свойства покрытия (оксидные включения, пористость, неравномерное поглощение и т. д.).

Таблица 5.2 - Результаты измерения толщины покрытия

Зона	Микрометрические измерения, мкм			Термографические измерения, мкм			Отклонение, мкм/%
	Min/Max Значение	Среднее	Стандартное отклонение	Min/Max Значение	Среднее	Стандартное отклонение	
d1	77/176	117	37.7	71/179	93	12.5	-24/-20.5
d2	222/334	266	40.6	227/371	283	24.9	17/6.4
d3	281/408	347	37.5	361/486	414	19.2	67/19.3
d4	422/507	470	24.9	409/551	483	19.6	13/2.8
d5	617/735	679	39.1	661/818	747	26.3	68/10
d6	914/972	949	17.6	751/969	876	45.6	-73/-7.7
d7	948/1058	1004	39.4	818/1076	954	44.5	-50/-5
d8	987/1065	1038	24.6	799/1050	919	42.1	-0.119/-11.5

5.6 Выводы по Главе 5

В данной главе описан предложенный в рамках настоящего диссертационного исследования метод определения толщины покрытий, основанный на анализе кажущейся тепловой инерции и оптимального времени её наблюдения. Оптимальное время наблюдения было определено как точка пересечения кривой кажущейся тепловой инерции с заранее заданным пороговым

значением. Линейная зависимость между квадратным корнем оптимального времени наблюдения и толщиной покрытия была определена по результатам теоретического анализа, что позволило получить двухмерные распределения абсолютной толщины покрытия, а также её вариаций. По сравнению с другими методами определения толщины покрытий, предлагаемый подход сравнительно прост, надёжен и иллюстративен с точки зрения представления результатов. В отличие от других термографических методов, концепция порогового значения кажущейся тепловой инерции позволяет получить линейную зависимость толщины от искомого параметра (квадратного корня из порогового времени), что позволило создать более универсальные модели ТК с большим диапазоном толщин покрытий.

Апробация метода была проведена на результатах численного моделирования и экспериментальных данных ТК образцов с покрытием из Cr13%Fe, нанесённым методом термического напыления. Толщину покрытий варьировали от 0,1 до 1 мм. Аналитическое моделирование и эксперименты подтвердили линейную зависимость между толщиной покрытий и корнем квадратным из порогового времени, причём последнее было определено как среднее значение тепловой инерции подложки и покрытия в логарифмических координатах.

Результаты ИК термографии были подтверждены микрометрическим измерением толщины покрытия, в результате чего были получены средние значения толщины для различных слоев покрытия, а также стандартное отклонение определения толщины, величина которого составила 40 мкм. Следует отметить, что на результаты толщины покрытия методом тепловой инерции влияет ряд факторов, таких как конечная длительность теплового импульса, теплообмен с окружающей средой, шероховатость покрытия, неравномерное поглощение и т. д. Тем не менее, величина стандартного отклонения полученных результатов является удовлетворительной для практических целей.

Общие выводы по диссертации

- Проведён сравнительный анализ существующих методов НК, используемых для испытаний авиационных ПКМ. Показано, что активный ТК является одним из перспективных методов НК для испытаний изделий из ПКМ различной формы.
- 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 всем объёме материала, а не только на его поверхности. Кроме того, установлена неэффективность стандартных методов дефектометрии в случае дефектов малого размера, когда на результаты влияет трёхмерная 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. 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 её обучения, а также 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 в результатах обработки данных.
- Разработан метод определения глубины дефектов с учётом трёхмерной диффузии тепла, позволяющий решить задачу определения глубины дефектов с малым соотношением поперечных размеров к глубине. Метод основан на приближении аналитической модели к экспериментальным данным путём нелинейной подгонки. Данный метод показал наименьшую величину ошибки дефектометрии по сравнению с методом реконструкции термографического сигнала, который традиционно используют при анализе данных в задачах ТК с выраженной трёхмерной 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 микрометрическими измерениями. Линейный характер зависимости толщины от квадратного корня порогового времени делает метод универсальным и предпочтительным в сравнении с другими термографическими методами оценки толщины покрытий, например, на основе преобразования Фурье или анализа производных.

- Соискателем опубликовано 15 работ, из них 12 по теме диссертации, в том числе 11 статей в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science, 6 статей в журналах квартилей Q2, а также 3 публикации в журналах из перечня ВАК.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей диссертации применяют следующие сокращения и обозначения:

d – толщина дефекта, м

C – теплоемкость материала, Дж/(кг·К)

L – толщина изделия, м

d – глубина залегания дефекта, м

D – диаметр дефекта, м

T – температура (в активном тепловом контроле – избыточная температура), °С

T_d – температура поверхности над дефектом

T_{nd} – температура бездефектной области

ΔT – дифференциальный температурный сигнал (температурный контраст), °С

ΔT_m – максимальный температурный контраст, °С

x, y, z – декартовы координаты

Q – плотность мощности внешнего потока нагрева, Вт/м²

W – энергия импульса нагрева, Дж

α – температуропроводность материала, м²/с

λ – теплопроводность материала, Вт/(м·К)

ρ – плотность материала, кг/м³

t – текущее время, с

t_m – оптимальное время наблюдения дефектов, с

ИК – инфракрасный

НК – неразрушающий контроль

НС – нейронная сеть

ТК – тепловой контроль

ТФХ – теплофизические характеристики

УЗ – ультразвуковой

н.д. – не дефектная зона

д. – дефектная зона

ПКМ – полимерные композитные материалы

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчёте применены следующие термины с соответствующими определениями.

Активный тепловой неразрушающий контроль – тепловой неразрушающий контроль с обязательной тепловой стимуляцией.

Инфракрасная термография – совокупность методов и технических средств для дистанционной регистрации и анализа характеристик тепловых (температурных) полей объектов по их тепловому (инфракрасному) излучению.

Импульсный тепловой контроль – процедура теплового неразрушающего контроля, в которой стимуляция объектов контроля осуществляют тепловым импульсом (как правило, оптическим).

Температурное поле – распределение поверхностной температуры на контролируемом участке объекта контроля.

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

Тепловая инерция e - справочная характеристика материала, характеризующая «инерционность» изменения поверхностной температуры при импульсном нагреве, Дж/(м²·К·с^{1/2}).

Тепловой неразрушающий контроль – метод 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.

Тепловой поток (мощность теплового потока) – тепловая энергия, передаваемая через объект контроля в единицу времени (обычно на единицу площади), Вт, Вт/м².

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности) λ – справочная характеристика материала, характеризующая мощность теплового потока, распространяющегося от точки с большей температурой к точке с меньшей температурой, Вт/(м·К).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Avdelidis N.P. et al. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT // *Prog. Aerosp. Sci.* 2004. Vol. 40, № 3. P. 143–162.
2. Shepard S.M. Flash Thermography of Aerospace Composites 2 . Thermographic Signal Reconstruction. 2007. P. 1–7.
3. Ibarra-Castanedo C. et al. Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography // *Nondestruct. Test. Eval.* 2007. Vol. 22, № 2–3. P. 199–215.
4. Bossi R. H. ASNT Industry Handbook: Aerospace NDT. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 2014. 450 p.
5. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat in solids. Oxford: Oxford Univ. Press, 1959. 580 p.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: ГИТТЛ, 1952.
7. Avdelidis N.P., Hawtin B.C., Almond D.P. Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites // *NDT E Int.* 2003. Vol. 36, № 6. P. 433–439.
8. Clyne T.W., Hull D. An introduction to composite materials. Cambridge university press, 2019.
9. Federal Aviation Administration (FAA). Aviation Maintenance Technician Handbook. Aviation Supplies & Academics, 2018. 696 p.
10. Scott I.G., Scala C.M. A review of non-destructive testing of composite materials // *NDT Int.* 1982. Vol. 15, № 2. P. 75–86.
11. Rose J.L. A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential // *J. Press. Vessel Technol.* 2002. Vol. 124, № 3. P. 273–282.
12. Vary A., Bowles K.J. An ultrasonic-acoustic technique for nondestructive evaluation of fiber composite quality // *Polym. Eng. Sci.* 1979. Vol. 19, № 5. P. 373–376.
13. Wang B. et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review // *Adv. Mech. Eng.* 2020. Vol. 12, № 4. P. 168781402091376.
14. Thomas A.D.H. et al. Real-time Industrial Visual Inspection: A Review // *Real-Time Imaging.* 1995. Vol. 1, № 2. P. 139–158.
15. Steinchen W. et al. Non-destructive testing of aerospace composite materials using digital shearography // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.* 1998. Vol. 212, № 1. P. 21–30.
16. Løkberg O.J., Malmo J.T. Detection of defects in composite materials by TV holography // *NDT Int.* 1988. Vol. 21, № 4. P. 223–228.
17. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // *Nat. Photonics.* 2007. Vol. 1, № 2. P. 97–105.

18. Dobroiu A., Otani C., Kawase K. Terahertz-wave sources and imaging applications // *Meas. Sci. Technol.* 2006. Vol. 17, № 11. P. R161–R174.
19. Vavilov V.P., Burleigh D.D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing // *NDT E Int.* Elsevier, 2015. Vol. 73. P. 28–52.
20. Mendioroz A. et al. Characterization and spatial resolution of cracks using lock-in vibrothermography // *NDT E Int.* 2014. Vol. 66. P. 8–15.
21. Vrana J. et al. MECHANISMS AND MODELS FOR CRACK DETECTION WITH INDUCTION THERMOGRAPHY // *AIP Conference Proceedings.* AIP, 2008. Vol. 975. P. 475–482.
22. Sojasi S. et al. Infrared Testing of CFRP Components: Comparisons of Approaches using the Tanimoto criterion // *NDT Canada.* 2015. № June. P. 1–8.
23. Junyan L. et al. Study on probability of detection (POD) determination using lock-in thermography for nondestructive inspection (NDI) of CFRP composite materials // *Infrared Phys. Technol.* Elsevier B.V., 2015. Vol. 71. P. 448–456.
24. Vavilov V.P. Pulsed thermal NDT of materials: back to the basics // *Nondestruct. Test. Eval.* 2007. Vol. 22, № 2–3. P. 177–197.
25. Gordiyenko E.Y. et al. Nondesructive Testing of Composite Materials of Aircraft Elements by Active Thermography // *Nauk. ta innovacii.* 2018. Vol. 14, № 2. P. 39–50.
26. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials // *Procedia Struct. Integr.* Elsevier B.V., 2016. Vol. 1. P. 50–57.
27. SCHOONAH D.J.W., GOULD J.D., MILLER L.A. Studies of Visual Inspection // *Ergonomics.* 1973. Vol. 16, № 4. P. 365–379.
28. Felice M. V., Fan Z. Sizing of flaws using ultrasonic bulk wave testing: A review // *Ultrasonics.* 2018. Vol. 88. P. 26–42.
29. Gros X.E., Ogi K., Takahashi K. Eddy Current, Ultrasonic C-Scan and Scanning Acoustic Microscopy Testing of Delaminated Quasi-Isotropic CFRP Materials: A Case Study // *J. Reinf. Plast. Compos.* 1998. Vol. 17, № 5. P. 389–405.
30. Ellison A., Kim H. Shadowed delamination area estimation in ultrasonic C-scans of impacted composites validated by X-ray CT // *J. Compos. Mater.* 2020. Vol. 54, № 4. P. 549–561.
31. Banhart J. et al. X-ray and neutron imaging – Complementary techniques for materials science and engineering // *Int. J. Mater. Res.* 2010. Vol. 101, № 9. P. 1069–1079.
32. Stock S.R. Recent advances in X-ray microtomography applied to materials // *Int. Mater. Rev.* 2008. Vol. 53, № 3. P. 129–181.

33. De Angelis G. et al. A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization // *NDT E Int.* 2012. Vol. 45, № 1. P. 91–96.
34. Zhong S. Progress in terahertz nondestructive testing: A review // *Front. Mech. Eng.* 2019. Vol. 14, № 3. P. 273–281.
35. Dong J. et al. Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves // *Compos. Part B Eng.* 2015. Vol. 79. P. 667–675.
36. Angioni S.L. et al. An Analytical Model for Defect Depth Estimation Using Pulsed Thermography // *Exp. Mech. Experimental Mechanics*, 2016. Vol. 56, № 6. P. 1111–1122.
37. Gresslehner K., Sekelja J. Signal to Noise Ratio Threshold in Active Thermography 2 . Experiment and Analyses Techniques. P. 0–7.
38. Oswald-Tranta B. Comparative study of thermal contrast and contrast in thermal signal derivatives in pulse thermography // *NDT E Int.* 2017. Vol. 91. P. 36–46.
39. Rothbart N. et al. Probability of detection analysis of round robin test results performed by flash thermography // *Quant. Infrared Thermogr. J.* Taylor & Francis, 2017. Vol. 14, № 1. P. 1–23.
40. Peeters J. et al. Robust quantitative depth estimation on CFRP samples using active thermography inspection and numerical simulation updating // *NDT E Int.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 87, № February 2017. P. 119–123.
41. Daryabor P., Safizadeh M.S. Comparison of three thermographic post processing methods for the assessment of a repaired aluminum plate with composite patch // *Infrared Phys. Technol.* Elsevier B.V., 2016. Vol. 79. P. 58–67.
42. Maldague X., Marinetti S. Pulse phase infrared thermography // *J. Appl. Phys.* 1996. Vol. 79, № 5. P. 2694–2698.
43. Ibarra-castanedo C. Quantative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase Thermography. 2005. P. 188.
44. Balageas D.L., Krapez J.C., Cielo P. Pulsed photothermal modeling of layered materials // *J. Appl. Phys.* 1986. Vol. 59, № 2. P. 348–357.
45. Sun J. Method for thermal tomography of thermal effusivity from pulsed thermal imaging: pat. US 7,365.330 B1 USA. US, 2008. Vol. 1, № 12.
46. Krapez J.-C., Balageas D. Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography // *Proceedings of the 1994 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.* QIRT Council, 1994.
47. Favro L.D. et al. Imaging the early time behavior of reflected thermal wave pulses / ed. Semanovich

S.A. 1995. P. 162–166.

48. Badghaish A.A., Fleming D.C. Non-destructive Inspection of Composites Using Step Heating Thermography // *J. Compos. Mater.* 2008. Vol. 42, № 13. P. 1337–1357.

49. Oswald-Tranta B. Time and frequency behaviour in TSR and PPT evaluation for flash thermography // *Quant. Infrared Thermogr. J.* Taylor & Francis, 2017. Vol. 14, № 2. P. 164–184.

50. Carslaw H.S. Introduction to the mathematical theory of heat in solids. Macmillan, 1921.

51. Maillet D. Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms. John Wiley & Sons Inc, 2000.

52. Ibarra-Castanedo C. et al. Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data / ed. Miles J.J., Peacock G.R., Knettel K.M. 2006. P. 620514.

53. Bendada A., Erchiqui F., Lamontagne M. Pulsed thermography in the evaluation of an aircraft composite using 3D thermal quadrupoles and mathematical perturbations // *Inverse Probl.* 2005. Vol. 21, № 3. P. 857–877.

54. Salazar A., Garrido F., Celorrio R. Thermal diffusivity of rods, tubes, and spheres by the flash method // *J. Appl. Phys.* 2006. Vol. 99, № 6. P. 066116.

55. Bernegger R. et al. Applicability of a 1D Analytical Model for Pulse Thermography of Laterally Heterogeneous Semitransparent Materials // *Int. J. Thermophys.* 2018. Vol. 39, № 3. P. 39.

56. Abate J., Whitt W. A Unified Framework for Numerically Inverting Laplace Transforms // *INFORMS J. Comput.* 2006. Vol. 18, № 4. P. 408–421.

57. 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 Phys. Technol.* 2020. Vol. 107. P. 103289.

58. Bharara M., Cobb J.E., Claremont D.J. Thermography and Thermometry in the Assessment of Diabetic Neuropathic Foot: A Case for Furthering the Role of Thermal Techniques // *Int. J. Low. Extrem. Wounds.* 2006. Vol. 5, № 4. P. 250–260.

59. Dudzik S. Two-stage neural algorithm for defect detection and characterization uses an active thermography // *Infrared Phys. Technol.* Elsevier B.V., 2015. Vol. 71, № April 2015. P. 187–197.

60. Almond D.P., Pickering S.G. An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit // *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111, № 9. P. 093510.

61. Salazar A. et al. Extending the flash method to measure the thermal diffusivity of semitransparent solids // *Meas. Sci. Technol.* 2014. Vol. 25, № 3. P. 035604.

62. Chulkov A.O. et al. Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating

- defect depth in infrared thermographic nondestructive testing // *Infrared Phys. Technol.* 2019. Vol. 102.
63. Tang Q. et al. Quantitative detection of defects based on Markov–PCA–BP algorithm using pulsed infrared thermography technology // *Infrared Phys. Technol.* 2016. Vol. 77. P. 144–148.
64. Švantner M., Muzika L., Houdková Š. Quantitative inspection of coating thickness by flash-pulse thermography and time-power transformation evaluation // *Appl. Opt.* 2020. Vol. 59, № 17. P. E29.
65. Shepard S.M. Automated processing of thermographic derivatives for quality assurance // *Opt. Eng.* 2007. Vol. 46, № 5. P. 051008.
66. Sirikham A., Zhao Y., Mehnen J. Determination of thermal wave reflection coefficient to better estimate defect depth using pulsed thermography // *Infrared Phys. Technol.* 2017. Vol. 86. P. 1–10.
67. Zeng Z. et al. Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography // *NDT E Int.* 2012. Vol. 48. P. 39–45.
68. Zhao Y. et al. A novel defect depth measurement method based on Nonlinear System Identification for pulsed thermographic inspection // *Mech. Syst. Signal Process.* 2017. Vol. 85. P. 382–395.
69. Vozár L., Hohenauer W. Flash method of measuring the thermal diffusivity. A review // *High Temp. Press.* 2003. Vol. 35/36, № 3. P. 253–264.
70. Boué C., Fournier D. Infrared thermography measurement of the thermal parameters (effusivity, diffusivity and conductivity) of materials // *Quant. Infrared Thermogr. J.* 2009. Vol. 6, № 2. P. 175–188.
71. Almond D.P., Lau S.K. Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 1994. Vol. 27, № 5. P. 1063–1069.
72. Marinetti S. et al. Thermographic inspection of TBC coated gas turbine blades: Discrimination between coating over-thicknesses and adhesion defects // *Infrared Phys. Technol.* 2007. Vol. 49, № 3. P. 281–285.
73. Sd3d. PLA Technical Data Sheet [Electronic resource]. URL: https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf.
74. Moskovchenko A. et al. Active IR Thermography Evaluation of Coating Thickness by Determining Apparent Thermal Effusivity // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13, № 18. P. 4057.
75. Sharath D., Menaka M., Venkatraman B. Defect Characterization Using Pulsed Thermography // *J. Nondestruct. Eval.* 2013. Vol. 32, № 2. P. 134–141.
76. Grys S. Determining the dimension of subsurface defects by active infrared thermography – experimental research // *J. Sensors Sens. Syst.* 2018. Vol. 7, № 1. P. 153–160.
77. Parker G. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* // *Guide-Wave Optical Communications: Materials*. 2001. P. 3703–3707.

78. Kutz M. Handbook of Environmental Degradation of Materials. William Andrew, 2018. 684 p.
79. Shrestha R., Kim W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography – Part I: Simulation // *Infrared Phys. Technol.* Elsevier B.V., 2017. Vol. 83. P. 124–131.
80. Tang Q. et al. Theoretical and experimental study on thermal barrier coating (TBC) uneven thickness detection using pulsed infrared thermography technology // *Appl. Therm. Eng.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 114. P. 770–775.
81. Ranjit S., Chung Y., Kim W. Thermal Behavior Variations in Coating Thickness Using Pulse Phase Thermography // *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.* 2016. Vol. 36, № 4. P. 259–265.
82. ZHAO S. et al. Quality evaluation for air plasma spray thermal barrier coatings with pulsed thermography // *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* Chinese Materials Research Society, 2011. Vol. 21, № 4. P. 301–306.
83. Bison P.G. et al. Inspecting thermal barrier coatings by IR thermography / ed. Cramer K.E., Maldague X.P. 2003. P. 318.
84. Cernuschi F., Marinetti S. Discrimination Between Over-Thickness and Delamination of Thermal Barrier Coatings by Apparent Thermal Effusivity Thermographic Technique // *J. Therm. Spray Technol.* 2010. Vol. 19, № 5. P. 958–963.
85. Arizmendi-Morquecho A. et al. Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying // *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014. Vol. 2014. P. 1–11.
86. Yao H.H. et al. Influence of Feedstock Materials and Spray Parameters on Thermal Conductivity of Wire-Arc-Sprayed Coatings // *J. Mater. Eng. Perform.* 2017. Vol. 26, № 3. P. 1108–1113.
87. Švantner, Muzika, Houdková. Quantitative Inspection of Coatings Thickness by Time-Power Transformation Flash Pulse Thermographic Method // *Proceedings.* 2019. Vol. 27, № 1. P. 32.

Приложение А

Средняя относительная погрешность оценки глубины с использованием методов TSR и нелинейной подгонки (теоретические данные).

Истинная глубина, d_t (mm)	Глубина, определённая методом TSR, (2я производная)	Относительная ошибка для TSR, $\frac{d_p-d_t}{d_t} \times 100\%$ (%)	Глубина, определённая методом NLF	Относительная ошибка для NLF, $\frac{d_p-d_t}{d_t} \times 100\%$ (%)	R измеренная методом NLF
Отверстие D = 1 mm					
0.2	0.17	-17.15	0.18	-10.95	0.74
0.5	0.41	-18.84	0.46	-7.06	0.84
1	0.79	-21.13	0.96	-3.60	0.94
Отверстие D = 3 mm					
0.6	0.54	-9.82	0.59	-2.93	0.91
1.5	1.24	-17.11	1.45	-3.16	0.94
3	2.32	-22.62	2.88	-4.12	0.93
Отверстие D = 5 mm					
1	0.91	-9.26	0.99	-1.09	0.92
2.5	2.07	-17.32	2.39	-4.36	1
5	3.88	-22.32	4.74	-5.20	0.91
Диск D = 1 mm					
0.2	0.16	-20.00	0.18	-11.8	0.73
0.5	0.41	-18.84	0.48	-4.54	0.90
1	0.79	-21.13	0.98	-2.50	1
Диск D = 3 mm					
0.6	0.55	-8.43	0.59	-2.40	0.87
1.5	1.23	-17.85	1.46	-2.58	0.99
3	2.31	-23.15	2.82	-5.86	0.79
Диск D = 5 mm					
1	0.90	-9.77	0.98	-2.37	0.81
2.5	2.04	-18.57	2.40	-3.98	0.85
5	3.80	-24.03	4.64	-7.19	0.62
Сфера D = 1 mm					
0.2	0.18	-11.80	0.19	-6.05	0.34
0.5	0.45	-10.28	0.52	3.92	0.53
1	0.87	-13.39	1.05	4.78	0.70
Сфера D = 3 mm					
0.6	0.54	-9.82	0.60	-0.60	0.39
1.5	1.30	-13.27	1.59	6.29	0.59
3	2.55	-15.17	3.09	2.85	0.62
Сфера D = 5 mm					
1	0.91	-8.76	0.99	-0.29	0.39
2.5	2.16	-13.68	2.68	7.17	0.60
5	4.24	-15.16	5.11	2.21	0.57

Приложение Б

Средняя относительная погрешность оценки глубины с использованием методов TSR и нелинейной подгонки (экспериментальные данные).

Истинная глубина, d_t (mm)	Глубина, определённая методом TSR, (2я производная)	Относительная ошибка для TSR, $\frac{d_p-d_t}{d_t} \times 100\%$ (%)	Глубина, определённая методом NLF	Относительная ошибка для NLF, $\frac{d_p-d_t}{d_t} \times 100\%$ (%)	R измеренная методом NLF
Отверстия D = 1 mm					
0.3	0.16	-46.10	0.29	-2.47	0.39
0.45	0.20	-55.55	0.59	30.47	0.93
0.6	0.40	-33.33	0.63	5.98	0.88
0.75	.*	-	0.76	1.87	0.53
0.9	-	-	1.05	16.78	0.84
1.05	-	-	1.18	11.92	0.76
Отверстия D = 3 mm					
0.6	0.37	-38.27	0.61	1.57	0.67
0.9	0.45	-49.99	0.92	2.39	0.77
1.2	0.85	-29.28	1.10	-8.53	0.67
1.35	1.01	-25.21	1.47	8.77	0.86
1.5	1.01	-32.69	1.49	-0.95	0.58
1.65	1.21	-26.52	1.60	-2.91	0.71
1.8	-	-	1.65	-8.55	0.50
2.1	-	-	1.91	-8.85	0.81
2.4	-	-	2.13	-11.35	0.46
Отверстия D = 5 mm					
1.5	0.80	-46.65	1.19	-20.77	0.58
1.8	1.47	-41.75	1.89	5.13	0.62
2.1	1.22	-41.84	2.02	-3.62	0.69
2.25	1.31	-18.54	1.86	-17.30	0.62
2.4	-	-	2.21	-8.02	0.69
2.55	-	-	2.32	-9.13	0.53
2.7	-	-	2.45	-9.19	0.60
3	-	-	2.80	-6.59	0.49
Диск D = 1 mm					
0.3	0.16	-46.1	0.42	39.97	0.43
0.45	-	-	0.57	25.80	0.57
0.6	-	-	0.70	17.17	0.65
0.75	-	-	0.81	7.76	0.44
0.9	-	-	1.13	25.82	0.69
1.05	-	-	1.23	17.33	0.46
Диск D = 3 mm					
0.6	0.40	-33.33	0.65	7.90	0.63
0.9	0.55	-38.42	1.02	12.97	0.32
1.2	0.89	-25.90	1.10	-8.29	0.54
1.35	1.01	-24.97	1.28	-5.13	0.53
1.5	1.15	-23.22	1.56	4.09	0.57

1.65	1.30	-21.16	1.60	-3.02	0.55
1.8	1.25	-30.43	1.90	5.72	0.68
2.1	-	-	2.22	5.90	0.52
2.4	-	-	2.14	-11.04	0.35
Диск D = 5 mm					
1.5	1.14	-23.79	1.57	4.65	0.69
1.8	1.36	-24.32	1.99	10.62	0.71
2.1	1.70	-19.26	2.12	1.16	0.56
2.25	1.71	-24.04	2.16	-3.88	0.51
2.4	-	-	2.20	-8.43	0.42
2.55	-	-	2.25	-11.62	0.44
2.7	-	-	2.38	-11.92	0.38
3	-	-	2.70	-10.00	0.45
Сфера D = 1 mm					
0.3	-	-	-	-	-
0.45	0.26	-43.20	0.58	29.38	0.34
0.6	0.28	-53.33	0.62	3.25	0.42
0.75	0.34	-54.27	0.92	22.57	0.67
0.9	-	-	0.84	-6.31	0.47
1.05	-	-	1.00	-4.76	0.60
Сфера D = 3 mm					
0.6	0.40	-33.33	0.67	11.25	0.27
0.9	0.55	-39.08	1.14	26.86	0.24
1.2	0.77	-35.74	1.26	4.70	0.51
1.35	1.01	-24.97	1.37	1.29	0.49
1.5	1.09	-27.10	1.59	5.73	0.63
1.65	-	-	1.85	12	0.63
1.8	-	-	1.86	3.42	0.87
2.1	-	-	2.17	3.37	0.48
Сфера D = 5 mm					
1.5	0.87	-42.21	1.11	-26.15	0.26
1.8	1.01	-43.73	1.44	-19.87	0.25
2.1	1.25	-40.49	2.00	-4.54	0.30
2.25	-	-	1.75	-22.38	0.17
2.4	-	-	2.19	-8.83	0.27
2.55	-	-	2.10	-17.55	0.27
2.7	-	-	2.70	0.12	0.32
3	-	-	2.61	-13.16	0.27



Stepanov I.B., Deputy Prorector for Science

National Research Tomsk Polytechnic University

Subject: A. Moskovchenko thesis

This letter is to confirm that the results of the dissertation work of Mr. Alexey Moskovchenko have been implemented in the scientific research at New Technologies Research Center of University of West Bohemia.

The developed algorithms and methods presented in the thesis “Developing the thermal defectometry algorithms of metal coatings and composite materials with different optical properties” have been used in scientific research work related to the following projects:

1) the algorithm of defect depth characterization applied to defects with low size/depth aspect ratio and low thermal reflection, as well as the algorithm of detecting delaminations in semi-transparent composites, were used in the research related to the following project: Europe space agency project «Non-contact NDI for Polymeric Composite Structures, contract № 4000129336/19/NL/RA»

2) the algorithm of coating thickness evaluation by determining apparent thermal effusivity was used in the research related to the European Regional Development Fund (ERDF) project: “LABIR-PAV/Pre-application research of infrared technologies” Reg. No. CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/0010018”.

Sincerely yours,

Západočeská univerzita v Plzni
 Nové technologie - výzkumné centrum
 Termomechanika technologických procesů
 Doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.
 Head of Department



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):
02069303,
Company Number: 027000890168,
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 016902004

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет»
Томский политехнический университет (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.+7-3822-606333, +7-3822-701779,
факс +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 016902004

№ _____
на № _____ от _____
справка по диссертации А.И. Московченко

«Утверждаю»
Проректор по науке и трансферу
технологий
Л.Г. Сухих

« _____ »



СПРАВКА

об использовании материалов диссертационной работы А.И. Московченко «Разработка алгоритмов тепловой дефектометрии металлических покрытий и композиционных материалов с различной оптической прозрачностью», представленной по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», в научной-исследовательской работе в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Диссертационные исследования А.И. Московченко связаны с: 1) разработкой методики и алгоритмов дефектометрии авиационных композиционных материалов различных типов, имеющих различную оптическую прозрачность, в том числе, оценки параметров неоднородностей малых размеров; 2) разработкой методики бесконтактного контроля толщины металлических покрытий, основанной на анализе теплофизических свойств покрытия и подложки; 3) исследованием автоматизированных алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии, основанных на использовании искусственных нейронных сетей.

Результаты диссертационных исследований Московченко А.И. были использованы в Томском политехническом университете (Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности) при выполнении грантов Российского научного фонда №17-19-01047, №17-19-01047п и № 19-79-00049.

Заведующий Научно-производственной
лабораторией «Тепловой контроль» ИШНКБ

В.П. Вавилов