

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Шагдыров Батор Ильич

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И МЕТОДИК
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕПЛОВОЙ
ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И ДЕФЕКТOMETРИИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Томск – 2023

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

Научный руководитель:

Чулков Арсений Олегович

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

Официальные оппоненты:

Лобода Егор Леонидович

Доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физической и вычислительной механики Механико-математического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Клопотов Анатолий Анатольевич

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 28 декабря 2023 г. В 12:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

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



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований

Полимерные композиционные материалы, а именно, угле- и стеклопластики, широко используются в авиа- и ракетостроении, нефтегазовой промышленности, автомобиле- и судостроении. Применение таких материалов, например, при производстве космической и авиационной техники позволяет сэкономить от 5 до 30 % массы летательных аппаратов. Надежность и работоспособность ответственных элементов конструкций высокотехнологичной техники обеспечивается, в том числе, высоким качеством композиционных материалов, которое напрямую связано со своевременным и достоверным НК, проводимым как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации. Активный ТК является эффективным инструментом неразрушающих испытаний ПКМ и может быть использован в качестве как основного, так и дополнительного метода НК, в том числе, при комбинировании с традиционными ультразвуковым и радиационным видами НК. Ввиду этого, растет интерес к ТК со стороны отечественных высокотехнологичных отраслей промышленности. Повышение достоверности, производительности и улучшение повторяемости результатов ТК требует разработки новых подходов, связанных с автоматизацией процедуры контроля и обработки данных. Разработка методик и программных алгоритмов автоматизированной обработки результатов контроля, в том числе, с использованием алгоритмов на базе искусственных нейронных сетей, также является актуальной задачей НК, позволяет существенно расширить практическое применения активного ТК и повысить качество отечественной техники.

Степень разработанности темы

В России развитие теплового метода неразрушающего контроля началось в 1970-х годах и описано в первых публикациях Н.А. Бекешко, В.П. Вавилова, Д.А. Рапопорта, В.В. Ширяева и др. В настоящее время наиболее заметные отечественные научные исследования в области ТК проводят В.П. Вавилов и А.О. Чулков (НИ ТПУ, г. Томск), О.Н. Будадин (ЦНИИ СМ, г. Хотьково), В.А. Захаренко (ОмГТУ, г. Омск), В.Н. Чернышов (ТГТУ, г. Тамбов), М.И. Щербаков (ИРТИС, г. Москва), 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.

Зарубежные исследования в области ТК описаны в статьях X. Maldague (Университет Лавалья, Канада), J.-C. Batsale (Университет Бордо, Франция), В. Oswald-Tranta (Университет Леобен, Австрия), М. Omar (Университет Халифа, ОАЭ), J. Morikawa (Токийский институт технологий, Япония), С. Maierhofer (Институт исследования материалов, Германия), S. Sfarra (Университет Аквилы, Италия) и многих других.

Настоящая диссертационная работа базируется на исследованиях в области активного ТК, выполненных в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (НИ ТПУ) в рамках научно-технических проектов, финансируемых РФФИ, РФФИ и рядом промышленных предприятий, а также развивает результаты исследований, изложенные в диссертациях А.О. Чулкова, А.И. Московченко, Пань Яняна и др. Ряд исследований были выполнены в рамках научной стажировки соискателя в научной группе профессора М. Ciavarella в Политехническом Университете г. Бари, Италия.

Цель исследования – разработка методик и программных алгоритмов для автоматизированной обработки результатов активного теплового контроля ПКМ, а именно, обнаружения дефектов и определения их параметров.

Задачи исследования

- Разработать программный алгоритм для автоматизированного определения поперечных размеров и площади дефектов композиционных материалов, основанный на пиксельном анализе последовательностей термограмм.

- Разработать программный алгоритм и методику обучения нейронной сети (НС) для автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии.

- Разработать технологию и изготовить наборы стандартных (контрольных) образцов из композиционных материалов для разработки и тестирования программных алгоритмов автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии.

- Провести тестирование разработанных программных алгоритмов на стандартных (контрольных) образцах с целью анализа их эффективности.

Объект исследования – результаты теплового неразрушающего контроля при оптическом нагреве в виде последовательностей инфракрасных термограмм, отражающих динамику теплопередачи в твердых телах со скрытыми дефектами.

Предмет исследования – алгоритмы автоматизированной обработки результатов контроля, методики автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии.

Научная новизна

- Алгоритм автоматизированного определения зон с минимальной и максимальной температурой в дефектных областях обеспечивает повышение температурных контрастов в области дефектов приблизительно в 2 раза и снижение разброса результатов дефектометрии на 15% по сравнению с ручной процедурой обработки результатов контроля.

- Пороговый анализ температурных сигналов в автоматизированном режиме позволяет строить бинарные карты дефектов, определять их координаты и поперечные размеры с учетом трехмерной диффузии тепла.

- Искусственная нейронная сеть, обученная на динамических температурных сигналах в отдельных точках инфракрасных термограмм стандартных образцов, обеспечивает в автоматизированном режиме обнаружение дефектов, определение глубины их залегания, а также оценку количества воды в ячейках сотовых панелей с ошибкой, не превышающей 15%.

- Создана технология и изготовлены наборы стандартных образцов ПКМ с имитаторами производственных и эксплуатационных дефектов для их использования в тепловом контроле. Установлено, что применение экструдированного пенополистирола в качестве инородного включения обеспечивает достоверную имитацию расслоений, заполненных воздухом. Расхождение параметров температурных сигналов при имитации расслоений, заполненных воздухом и экструдированным пенополистиролом, составило не более 10%.

Практическая значимость работы

Разработанные методики и алгоритмы автоматизированной 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 методики ТК, принятые в НИ ТПУ. Используются элементы теории теплового неразрушающего контроля, созданные на основе фундаментальной теории теплопроводности для одномерных твёрдых тел. Численные решения трёхмерных задач теплопроводности твёрдых тел используются для моделирования нестационарного теплопереноса в твердых телах, содержащих структурные дефекты, неоднородности теплофизических характеристик, каверны, трещины и т. д. В работе используются эмпирические методы, связанные с постановкой эксперимента, валидацией 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), алгоритмов на базе искусственных НС, а также методов качественного и количественного анализа результатов температурных измерений, в частности, оценок отношения сигнал/шум, относительной ошибки измерения и т.п.

Положения, выносимые на защиту

- Методика автоматизированного ТК, основанная на анализе минимальной и максимальной температуры в дефектных зонах, позволяет повысить температурные контрасты в 2 раза и снизить разброс результатов тепловой дефектометрии на 20%.

- Пороговый анализ последовательностей динамических термограмм обеспечивает автоматизированное обнаружение и оценку параметров дефектов, а именно, координат и поперечных размеров с учетом трехмерной диффузии тепла.

- Для автоматизированного определения количества воды в авиационных сотовых панелях целесообразно использовать алгоритмы, работающие на базе НС. При этом величина ошибки при оценке количества воды в горизонтально ориентированных сотовых панелях не превышает 15%.

- Стандартные образцы, моделирующие воздушнонаполненные дефекты ПКМ вставками из экструдированного пенополистирола, обеспечивают достоверное воспроизведение параметров температурных сигналов в дефектных зонах.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов подтверждается соответствием результатов численного моделирования результатам, полученным экспериментальным путем. Результаты дефектоскопии и дефектометрии подтверждаются параметрами стандартных образцов, разработанных в настоящем исследовании. Полученные 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 программы ThermoCalc-3D (НИ ТПУ). Достоверность экспериментальных данных обеспечена применением современной высокочувствительной тепловизионной аппаратуры.

Апробация работы

Разработанные программные алгоритмы были протестированы на стандартных образцах с известными параметрами дефектов, предоставленными промышленными партнёрами. Научная составляющая работы была опубликована в рецензируемых журналах, а также доложена на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации. - 2019» и Всероссийских научно-технических конференциях по неразрушающему контролю и технической диагностики в 2020, 2021, 2022 и 2023 гг.

Личный вклад автора заключается в разработке и изготовлении стандартных образцов из углепластика, в том числе изделий сложной формы, а также образцов из полиметилметакрилата с искусственными дефектами, создании трехмерных моделей процесса переноса тепла в программах ThermoCalc-3D, проведении экспериментальных исследований по активному тепловому контролю ПКМ, тестировании разработанных программных алгоритмов, разработке методик обучения искусственных НС.

Связь диссертационного исследования с научно-техническими проектами

Диссертационные исследования связаны с выполнением грантов Российского научного фонда 17-79-10143, 19-79-00049, 17-19-01047, 22-19-00103, гранта «Конкурс образовательных проектов ВИУ-ИШФВП-304/2018», а также хозяйственных договоров

с ФГУП «ЦАГИ» №16.02.03-212/2021 и АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» № 226/3903-Д/16.02.03-363/2021.

Публикации

Соискателем опубликовано 24 научные работы, из которых 12 по теме диссертации, в том числе, 9 статей в изданиях, индексируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science, 4 из которых опубликованы в журналах квартиля Q2, 6 из опубликованных статей имеют версии на русском языке в журнале, входящем в перечень ВАК.

Структура и объем диссертационных исследований

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных литературных источников, включающего 67 работ, содержит 104 страницу текста, 52 рисунка, 15 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведено описание областей применения полимерных композиционных материалов, приведен обзор современного состояния методов неразрушающего контроля ПКМ. Выделены преимущества и недостатки различных методов неразрушающего контроля и рассмотрены наиболее распространённые процедуры активного теплового контроля ПКМ. Рассмотрены используемые в ТК алгоритмы обработки данных. На основании проведенного обзора сделаны выводы о необходимости разработки автоматизированных алгоритмов тепловой дефектоскопии и дефектометрии, а также разработке соответствующих методик.

Во второй главе представлены разработанные и изготовленные наборы образцов ПКМ (таблица 1) с имитаторами производственных и эксплуатационных дефектов, на которых была проведена апробация разработанных программных алгоритмов автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии. По теплофизическим характеристикам разработанные образцы соответствовали композиционным материалам, используемым авиакосмической отрасли промышленности.

Таблица 1 – Изготовленные стандартные образцы для теплового контроля

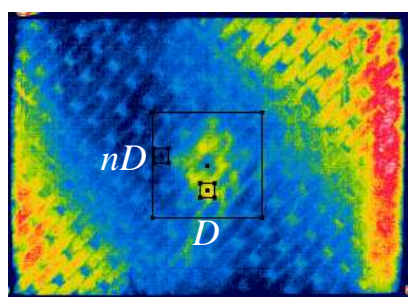
<p>1. Набор образцов ПКМ с молниезащитной сеткой. Разработан для апробации автоматизированного алгоритма обнаружения дефектов по оценке величин теплофизических характеристик материала в зоне ударного повреждения.</p>	
<p>2. Набор образцов, имитирующих теплозащитное покрытие металлической основы, разработан с целью апробации новых подходов при создании искусственных дефектов в стандартных образцах. Образцы были использованы для апробации алгоритмов автоматизированной дефектометрии на базе нейронных сетей (НС).</p>	
<p>3. Пластина из углепластика с искусственными расслоениями. Образец был изготовлен для разработки алгоритма дефектометрии углепластиковых монолитных композитов с использованием искусственных нейронных сетей.</p>	
<p>4. Сотовая панель с ячейками, заполненными водой. Образец был использован для апробации алгоритма автоматизированного обнаружения воды, определения ее количества, также для классификации вода/эпоксидная смола с использованием нейронных сетей.</p>	
<p>5. Изделие из углепластика со сложной геометрической формой. Образец был разработан с целью имитации дефектов в Т-соединениях, а также отработки процедуры ТК изделий сложной формы. Образец содержал 18 различных имитаторов производственных и эксплуатационных дефектов.</p>	

6. Пластина комбинированного ПКМ (углепластик и стеклопластик) с имитаторами расслоений различных типов. Образец разработан с целью определения оптимальных материалов для имитации внутренних расслоений в ПКМ, контролируемых тепловым методом. В качестве имитации дефектов использовали вставки фторопласта, экструдированного пенополистирола, а также плоскодонные отверстия.

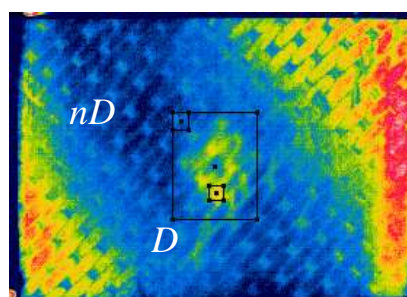


Представленные группы образцов были разработаны с целью исследования оптимальных способов имитации дефектов ПКМ производственного и эксплуатационного типов для активного теплового контроля. Кроме того, стандартные образцы были использованы с целью разработки алгоритмов автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии, а также возможностей активного ТК.

В третьей главе приведены результаты исследований в области разработки программных алгоритмов для автоматизированной обработки данных, полученных при классическом одностороннем тепловом контроле. Разработанные алгоритмы основаны на анализе температурных данных в каждом пикселе последовательностей термограмм. Один из алгоритмов обеспечивает обнаружение минимальных и максимальных значений температуры в текущей термограмме последовательности и позволяет проводить автоматизированную дефектоскопию результатов ТК. На рисунке 1 представлен пример работы автоматизированного алгоритма.



а)



б)

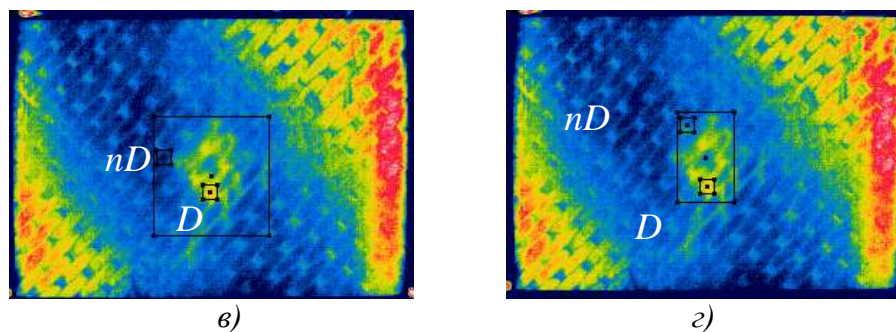


Рисунок 1 – Пример работы автоматизированного алгоритма выбора дефектной (D) и бездефектной (nD) областей, в обозначенных оператором границах:

- a - Оператор №3;
- b - Оператор №6;
- c - Оператор №5;
- z - Оператор №7

Разработанный алгоритм автоматизированного анализа термограмм позволил уменьшить разброс контролируемых параметров приблизительно в 4 раза при повышении уровня их контраста более чем в 2 раза по сравнению с ручной процедурой обработки.

Второй алгоритм обеспечивает автоматизированную дефектometriю, а именно, определяет размеры дефектной отметки с учетом диффузионного расплывания её границ. Результатом работы данного алгоритма является бинарная карта дефектов, на рисунке 2 приведены результаты автоматизированного обнаружения расслоений и ударного повреждения в образцах из углепластика.

Алгоритм позволяет определять форму, координаты и поперечные размеры дефектов с учетом диффузионного размытия их границ. Возможность гибкой регулировки параметров работы алгоритма позволяет учитывать изменение размеров дефектной отметки во времени с учетом диффузионного размытия их границ. Поперечные размеры дефектов могут быть определены по количеству пикселей в линиях, проведенных перпендикулярно друг другу в пределах обнаруженной области (размер дефектов определяют в миллиметрах согласно заданному масштабу).

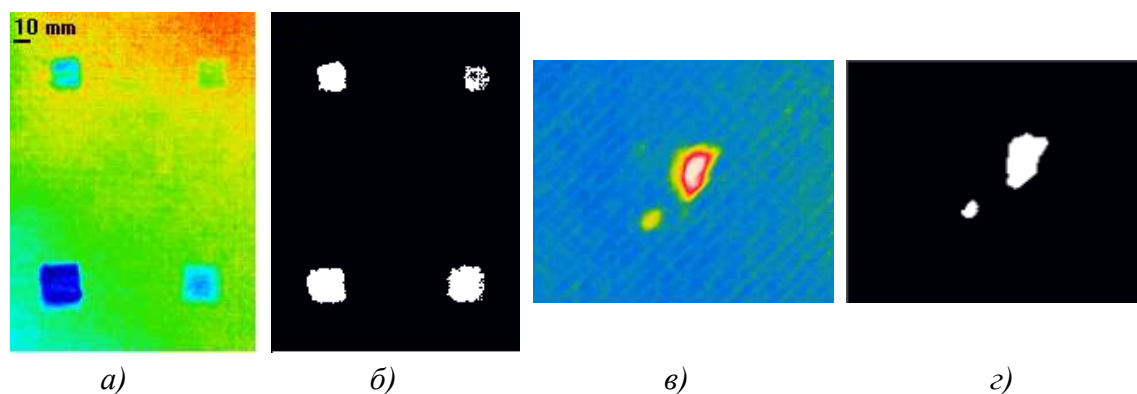


Рисунок 2 – Результаты автоматизированного обнаружения дефектов в углепластике:

- а* – ИК термограмма пластины из углепластика с 4-мя дефектами, расположенными на различных глубинах;
- б* – бинарная карта, предел дефектности 25%, глубина 3 пикселя;
- в* – ИК термограмма пластины из углепластика с дефектом сложной формы, вызванным ударным повреждением;
- г* – бинарная карта дефекта сложной формы, предел дефектности 40%, глубина 20 пикселей

Разработанные алгоритмы были использованы при проведении научных исследований по контролю стандартных образцов из композиционных материалов, которые содержали дефекты различной физической природы.

Глава 4 содержит результаты применения разработанной методики и программного алгоритма автоматизированной дефектоскопии и дефектоскопии с использованием искусственных нейронных сетей (НС). В работе использовали искусственную НС, реализованную с помощью пакета NNTools в среде Matlab.

Первый метод, основанный на алгоритмах машинного обучения, позволяет в автоматизированном режиме определять глубину залегания скрытых дефектов в структуре изделий из ПКМ. В данном случае сеть состояла из пяти скрытых слоев. Выходной слой имел линейную функцию активации. Критерием выбора количества слоев являлся компромисс между точностью определения глубины и скоростью проведения расчета. Обучение НС осуществляли путем подачи на ее вход пяти групп с данными, каждая из которых характеризовала определенную глубину залегания дефекта, а также пяти групп с «целями» – числовыми значениями истинных глубин дефектов. Группы с данными формировали из температурных профилей отдельных пикселей. Для

этого на платформе Matlab была разработана программа, с помощью которой на термограммах расставляли зоны размерами 3×3 пикселя, выбираемые в дефектных и бездефектных областях, как показано на рисунке 3.

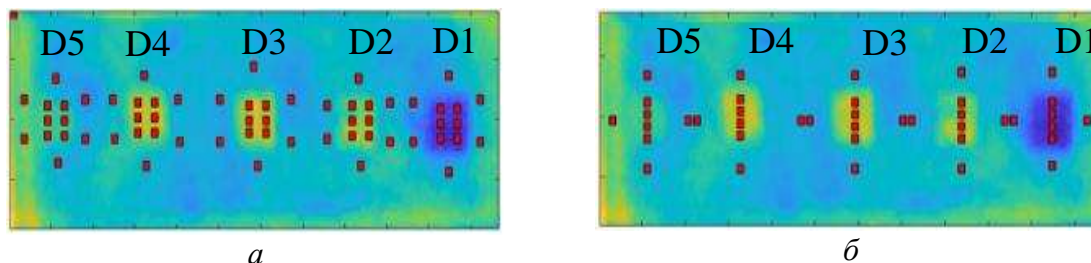


Рисунок 3 – Схема расположения точек, по которым проводили обучение НС и контроль ее работы при определении глубины залегания дефектов. Термограмма последовательности первых производных, 18-я секунда контроля

Таким образом, набор данных для обучения состоял из пяти групп, в каждую из которых входило 54 температурных профиля. Контроль глубины залегания проводили, подавая на вход НС 36 температурных профиля, а численный результат глубины залегания конкретного дефекта получали в виде 4-х значений, полученных путем усреднения значений 9-ти пикселей в каждой точке (см. рисунок 3б).

Большой блок исследований был проведен по определению оптимального алгоритма предварительной обработки данных, подаваемых на вход НС для ее обучения и, соответственно, применения. В частности, была проведена оценка величины ошибки определения глубины при предварительной обработке данных по 8 различным сценариям, а именно, по применению преобразования Фурье, метода анализа главных компонент, полиномиальной аппроксимации и др. (в соответствии с каждым сценарием была обработана последовательность термограмм: №1-№8). В зависимости от типа предварительной обработки последовательностей термограмм на вход НС подавали температурные профили дефектных областей, профили температурных сигналов и профили температурных контрастов.

В таблице 2 приведены результаты определения глубины залегания дефектов по температурным кривым. Для каждой дефектной области было получено по 4 значения глубины, соответствующих контрольным точкам. Выбор оптимального алгоритма предварительной обработки данных осуществляли по величине среднеквадратичного отклонения σ полученного значения от истинного.

Таблица 2 – Результаты определения глубины залегания дефектов при предварительной обработке входных данных различными алгоритмами

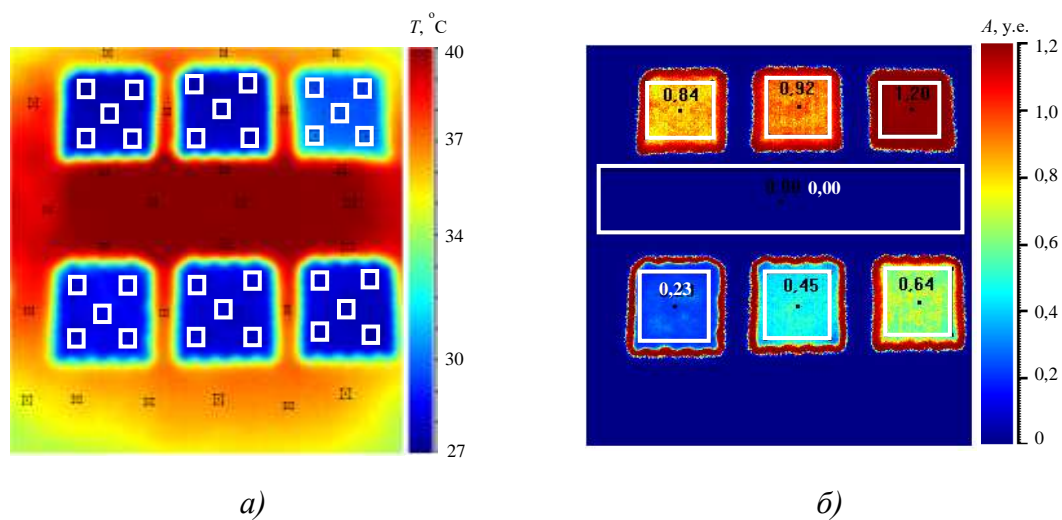
	№1	№2	№3	№4	№4'	№4''	№5	№6	№7	№8
D1 (h = 0,5 мм)										
Средняя глубина в контрольных точках, мм	0,54	0,57	0,52	0,50	0,52	0,68	0,50	0,50	0,49	0,83
	0,51	0,55	0,67	0,50	0,63	0,58	0,50	0,50	0,51	0,66
	0,51	0,57	0,59	0,50	0,53	0,53	0,50	0,49	0,52	0,62
	0,51	0,57	0,54	0,50	0,99	0,84	0,50	0,52	0,50	0,54
Среднее значение, мм	0,52	0,57	0,58	0,50	0,67	0,66	0,50	0,50	0,51	0,66
σ, мм	0,02	0,07	0,10	0,00	0,25	0,20	0,00	0,01	0,01	0,19
D2 (h = 1 мм)										
Средняя глубина в контрольных точках, мм	1,00	1,03	1,04	1,00	1,25	0,78	1,00	1,02	1,00	1,13
	1,03	1,04	1,01	1,00	1,08	0,90	1,00	0,99	0,96	1,11
	0,99	0,94	0,97	1,00	0,86	0,79	1,00	1,03	1,00	1,04
	1,03	1,00	1,08	1,00	1,08	0,84	1,08	1,00	1,00	0,87
Среднее значение, мм	1,01	1,00	1,03	1,00	1,07	0,83	1,02	1,01	0,99	1,04
σ, мм	0,02	0,04	0,05	0,00	0,15	0,18	0,04	0,02	0,02	0,11
D3 (h = 1,5 мм)										
Средняя глубина в контрольных точках, мм	1,73	1,58	1,60	1,76	1,66	1,70	1,48	1,50	1,52	1,53
	1,53	1,46	1,54	1,55	1,48	1,58	1,49	1,50	1,51	1,65
	1,51	1,47	1,52	1,50	1,45	1,49	1,50	1,49	1,48	1,53
	1,43	1,49	1,49	1,50	1,35	1,53	1,47	1,47	1,57	1,63
Среднее значение, мм	1,55	1,50	1,54	0,13	1,49	1,58	1,49	1,49	1,52	1,59
σ, мм	0,12	0,05	0,06	1,75	0,11	0,11	0,02	0,02	0,04	0,10
D4 (h = 2 мм)										
Средняя глубина в контрольных точках, мм	2,00	2,00	2,01	2,00	2,07	2,07	2,00	1,90	1,99	1,91
	1,76	1,95	1,99	2,00	0,93	2,11	2,01	1,91	2,10	2,08
	2,05	1,76	2,00	2,00	1,93	1,88	2,00	1,94	2,10	1,90
	2,56	2,46	2,51	2,5	1,96	1,83	2,02	1,86	1,96	1,82
Среднее значение, мм	2,09	2,04	2,13	2,13	1,72	1,97	2,01	1,90	2,04	1,93
σ, мм	0,31	0,26	0,26	0,25	0,54	0,12	0,01	0,10	0,07	0,12
D5 (h = 2,5 мм)										
Средняя глубина в контрольных точках, мм	2,25	2,45	2,33	2,50	2,06	2,38	2,50	2,48	2,47	2,50
	2,55	2,49	2,50	2,50	2,42	2,50	2,50	2,48	2,51	2,42
	2,04	1,92	1,50	2,00	2,02	1,93	2,50	2,48	2,51	2,49
	2,24	2,37	2,41	2,50	2,50	2,23	2,50	2,48	2,49	2,37
Среднее значение, мм	2,27	2,31	2,19	2,38	2,25	2,26	2,50	2,48	2,50	2,45
σ, мм	0,29	0,30	0,51	0,25	0,33	0,32	0,00	0,02	0,02	0,08
Σ σ, мм	0,76	0,72	0,98	2,25	1,38	0,93	0,07	0,17	0,16	0,60

Из полученных результатов следует, что предварительная обработка входных данных для обучения и проверки работы НС положительно влияет на точность определения глубины залегания дефектов. Это связано со снижением уровня шума

анализируемых графиков, а также снижением разброса полученных глубин. Наилучший результат был получен после предварительного преобразования исходной последовательности до первой производной, суммарный разброс всех величин составил 0,07 мм, против величины 0,76 мм, полученной при использовании исходной последовательности. Кроме того, для определения глубины дефекта по последовательности первых производных не требуется выбирать точки в бездефектной области, и это существенно улучшает результаты дефектометрии.

Второй метод, реализованный на основе алгоритма искусственного интеллекта, позволяет в автоматизированном режиме определять количественное содержание воды в ячейках авиационных сотовых конструкциях. Для автоматизированного определения количества воды в ячейках сот был использован программный модуль THERMO_NN (НИ ТПУ). Обучение НС проводили с использованием алгоритма наименьшей среднеквадратичной ошибки. Согласно ранее предложенной методике перед применением алгоритмов дефектометрии на базе НС целесообразна обработка данных методом термографической реконструкции сигнала. Такой подход позволяет «разделить» используемые для обучения данные, что обеспечивает меньший процент ошибки при применении обученной НС на конкретной серии экспериментов.

На рисунках 4б и 4г приведены карты дефектов, полученные с помощью НС. Цвет каждой из дефектных зон, а также бездефектной зоны, соответствует количеству воды согласно приведенной шкале. Следует отметить, что для зоны с ячейками, заполненными эпоксидной смолой, целью обучения было значение 1,2.



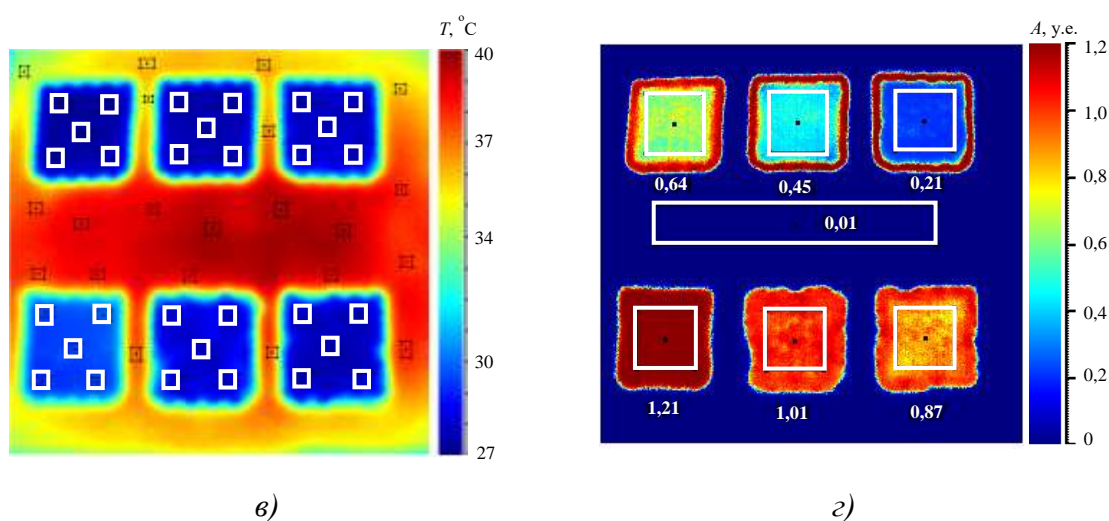


Рисунок 4 – Результаты автоматизированного определения содержания воды в сотовых панелях:

- a* - термограмма на 10-й секунде контроля, (схема контроля «снизу»);
- б* - карта содержания воды (контроль «снизу»);
- в* - термограмма на 10-й секунде контроля, показаны зоны, использованные для обучения НС (схема контроля «сверху»);
- г* - карта содержания воды (контроль «сверху»)

В таблице 3 приведены ошибки определения количества воды в сотах при различных схемах ТК. По данным результатам можно сделать вывод, что наибольшая погрешность (13 и 15%) относится к участкам панели, заполненным водой на 40% и 20% в схеме контроля «снизу». Для схемы испытаний «сверху» наибольшая величина ошибки составила 13 и 9% для участков с заполнением водой 40 и 80 %.

Таблица 3 – Результаты автоматизированного определения количества воды в сотовой панели

Истинное наполнение	Оценка наполнения ячеек сот, %						Бездефектные зоны
	Эпоксидная смола 100%	Вода					
		100%	80%	60%	40%	20%	
Цели обучения НС	1,2	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
Контроль по схеме «снизу» (вода в контакте с внутренней стороной обшивки)							
Оценка цели по экспериментальным данным	1,20	0,92	0,84	0,64	0,45	0,23	0
Величина ошибки, %	0	8	5	7	13	15	0
Контроль по схеме «сверху» (вода не контактирует с внутренней стороной обшивки)							
Оценка цели по экспериментальным данным	1,21	1,01	0,87	0,64	0,45	0,21	0,01
Величина ошибки, %	1	1	9	7	13	5	0

Результатом проведенного обучения нейронной сети является подтверждение возможности работы алгоритмов в поиске и количественном определении содержания воды в ячейках авиационных сотовых конструкциях, включая ситуации, где между водой и обшивкой имеется воздушный зазор. При этом величина ошибки оценки влагосодержания, по крайней мере, в лабораторных условиях, не превысила 15%. Предложенная процедура активного ТК может быть апробирована в рамках технического обслуживания воздушных судов в качестве дополнительной к пассивной диагностике.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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.

В исследовательских целях были разработаны различные наборы стандартных образцов с имитаторами производственных и эксплуатационных дефектов. На базе теоретического анализа предложены технологии изготовления контрольных образцов, а также изготовлены несколько типов контрольных образцов композитов с дефектами типа расслоений, вставок, ударных повреждений и воды в сотах. Установлено, что применение экструдированного пенополистирола в качестве инородного включения обеспечивает оптимальную имитацию расслоений, заполненных воздухом. Расхождение параметров температурных сигналов при имитации расслоений, заполненных воздухом и экструдированным пенополистиролом, составило не более 10%.

Разработаны алгоритмы автоматизированного анализа термограмм и автоматизированного обнаружения дефектных областей, которые были использованы при проведении научных исследований по контролю стандартных образцов из композиционных материалов, содержавших дефекты различной физической природы. Данные алгоритмы обеспечили повышение температурных контрастов в области дефектов приблизительно в 2 раза и снижение разброса результатов дефектометрии на 15% по сравнению с ручной процедурой обработки результатов контроля.

Разработан программный алгоритм автоматизированного проведения дефектоскопии и дефектометрии, который включает в себя участие НС и обработку

результатов с помощью морфологического анализа, позволяет получать карты дефектности с информацией о глубине залегания обнаруженных дефектов. На основании полученной карты алгоритм автоматически определяет поперечные размеры дефектов, рассчитывает их площади, а также определяет координаты дефектов. Алгоритм обеспечивает в автоматизированном режиме обнаружение дефектов, определение глубины их залегания, а также оценку уровня наполненности ячеек сотовых панелей водой с ошибкой, не превышающей 15%.

По диссертации опубликовано 24 научные работы, из которых 12 по теме диссертации, в том числе, 9 статей в изданиях, индексированных в базах данных SCOPUS и Web of Science, 4 из которых опубликованы в журналах квартиля Q2, 6 из опубликованных статей имеют версии на русском языке в журнале, входящем в перечень ВАК.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. **Shagdyrov B.I.**, Chulkov A.O., Vavilov V.P., Kladov D.Y., Stasevskii V.I. Detecting and evaluating water ingress in aviation honeycomb panels by using automated thermal nondestructive testing // Russian Journal of Nondestructive Testing (принята к печати).

Русскоязычная версия статьи: **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О., Вавилов В.П., Кладов Д., Стасевский В.Ю. Обнаружение и оценка количества воды в горизонтально ориентированных авиационных сотовых панелях с помощью автоматизированного теплового контроля // Дефектоскопия (принята к печати).

2. **Shagdyrov B.I.**, Chulkov A.O., Vavilov V.P., Kladov D.Y., Stasevskii V.I. A New Method of Active Thermal Testing: Combination of Heating and Forced Cooling // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – Т.59. – №5 – С.592-600.

Русскоязычная версия статьи: **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О., Вавилов В.П., Кладов Д., Стасевский В.Ю. Новый способ активного теплового контроля: комбинирование нагрева и принудительного охлаждения // Дефектоскопия. – 2023. – №5 – С.54-63.

3. **Shagdyrov B.I.**, Chulkov A.O., Vavilov V.P., Kladov D.Y. Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2023. – Т.42. – №20 – С.1-16.

4. **Shagdyrov B.I.**, Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A. Thermal flaw detection scanner for testing large-sized flat products made of composite materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Т.58. – №4 – С.301-307.

Русскоязычная версия статьи: **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А. Тепловой сканер-дефектоскоп для контроля крупногабаритных плоских изделий из композиционных материалов // Дефектоскопия. – 2021. – №4 – С.56-62.

5. **Shagdyrov B.I.**, Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P. Method and Equipment for Infrared and Ultrasonic Thermographic Testing of Large-Sized Complex-Shaped Composite Products // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Т.57. – №7 – С.619-626.

Русскоязычная версия статьи: **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Метод и аппаратура инфракрасного и ультразвукового термографического контроля крупногабаритных композиционных изделий сложной формы // Дефектоскопия. – 2021. – №7 – С.67-74.

6. **Shagdyrov B.I.**, Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Omar M., Siddiqui A.O. Prasad Y.L.V.D. Automated procedure for detecting and characterizing defects in GFRP composite by using thermal nondestructive testing // Infrared Physics & Technology. – 2021. – Т.102. – С.103675.

7. **Shagdyrov B.I.**, Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Kaledin V.O., Omar M. Active Thermal Testing of Impact Damage in 3D-Printed Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Т.56. – №12 – С.1083-1090.

Русскоязычная версия статьи: **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О., Вавилов В.П., Каледин В.О., Омар М. Активный тепловой контроль ударных повреждений в композиционных материалах, изготовленных методом 3D печати // Дефектоскопия. – 2020. – №12 – С.73-81.

8. **Shagdyrov B.I.**, Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Bedarev A.M., Yarkimbaev S. Synthesizing data of active infrared thermography under optical and ultrasonic stimulation of products made of complex-shaped CFRP // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Т.56. – №7 – С.595-601.

Русскоязычная версия статьи: **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Бедарев А.М., Яркимбаев Ш. Синтез данных активной инфракрасной термографии при оптической и ультразвуковой стимуляции изделий из углепластика сложной формы // Дефектоскопия. – 2020. – №7 – С.54-60.

9. **Shagdyrov B.I.**, Derusova D.A., Vavilov V.P., Chulkov A.O., Saeed N., Omar M. Evaluating impact damage in kevlar/carbon composites by using laser vibrometry and active infrared thermography // Electronics Letters. – 2020. – Т.56. – №19 – С.1001-1003.

10. **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О., Вавилов В.П., Бедарев А.М. Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий аэрокосмической отрасли с использованием оптической и ультразвуковой стимуляции // Тезисы докладов всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «Тестмат». – 2021. – С.181-192.

11. **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О. Исследование влияния ударных воздействий на теплофизические характеристики композиционных материалов методом активной инфракрасной термографии // Тезисы докладов Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. – 2020. – С.358-362.

12. **Шагдыров Б.И.**, Чулков А.О. Проведение экспериментальных исследований по обнаружению скрытых дефектов в гибридных композитах с использованием различных источников тепловой стимуляции // Тезисы докладов Всероссийской конференции Наука. Технологии. Инновации. – 2019. – С.405-410.