

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

На правах рукописи

ЧУЛКОВ АРСЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Научный консультант

доктор технических наук, профессор

Вавилов Владимир Платонович

Томск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ИСТОРИИ И СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	24
1.1 Предыстория развития ТНК.....	24
1.2 Научные группы, ведущие исследования в области ТНК.....	28
1.3 Процедуры активного ТНК и алгоритмы обработки данных.....	34
1.4. Области применения и современная аппаратура ТНК.....	42
1.5 Выводы по Главе 1	50
ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	51
2.1 Теплофизическая постановка задачи ТНК	51
2.2 Параметры, влияющие на результативность ТНК.....	53
2.3 Длительность и мощность импульса нагрева. Длительность процедуры контроля.....	54
2.4 Поперечные размеры дефектов.....	60
2.5 Глубина залегания дефектов	61
2.6 Толщина дефектов.....	64
2.7 Аддитивная и мультипликативная составляющие температурных шумов.....	65
2.8 Интенсивность теплообмена.....	67
2.9 Теплофизические характеристики материала объекта контроля	68
ГЛАВА 3. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПЛОСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СПОСОБОМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО СКАНИРОВАНИЯ.....	73
3.1 Сравнение распределенного импульсного и линейного непрерывного перемещающегося видов нагрева. Численное моделирование	77
3.2 Лабораторные установки, реализующие ТНК способом тепловизионного сканирования.....	81
3.3 Сравнение распределенного импульсного и линейного непрерывного перемещающегося видов нагрева. Экспериментальные данные	83

3.4 Разработка методики реконструкции термограмм, полученных способом тепловизионного сканирования	90
3.5 Сравнение результатов классического одностороннего теплового контроля с результатами, полученными способом тепловизионного сканирования с помощью самодвижущегося теплового дефектоскопа	93
3.6 Способ тепловизионного сканирования с использованием двух тепловизоров.....	97
3.7 Тепловой неразрушающий контроль крупногабаритных цилиндрических изделий способом тепловизионного сканирования	102
3.8 Выводы по Главе 3	108
ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТНК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ НА БАЗЕ ИНС.....	110
4.1 Автоматизированная дефектометрия с использованием ИНС, обученных на экспериментальных данных и результатах моделирования.....	111
4.1.1 Автоматизированная дефектоскопия и дефектометрия с использованием ИНС, обученных на экспериментальных данных	114
4.1.2 Автоматизированная дефектоскопия и дефектометрия с использованием ИНС, обученной на результатах моделирования.....	122
4.2 Практическая апробация разработанного алгоритма автоматизированной дефектометрии на базе ИНС с использованием контрольных образцов.....	126
4.2.1 Применение алгоритма на базе ИНС для автоматизированного определения толщины дефектов.....	134
4.3 Тепловая томография как инструмент автоматизированной дефектометрии	139
4.4 Выводы по Главе 4	142
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДИК ТНК МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ ПРОЗРАЧНОСТЬЮ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ШУМОВ.....	144

5.1 Комбинирование нагрева и принудительного охлаждения в ТНК: численное моделирование трехмерных задач контроля.....	145
5.2 Экспериментальная апробация способа ТНК с применением нагрева и принудительного охлаждения.....	156
5.3 Разработка новых методик ТНК с применением оптических, контактных и конвективных источников нагрева	163
5.3.1 Сравнение трех типов нагревателей для обнаружения дефектов в материалах, прозрачных в видимом спектре излучения.....	164
5.3.2 Сравнительная оценка эффективности оптического, контактного и конвективного типов нагрева при ТНК материалов с повышенным уровнем температурного шума.....	168
5.4 Выводы по Главе 5	174
ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ТНК ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ И ПРИНЦИПАМИ ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ.....	176
6.1 Роботизированная система ТНК крупногабаритных цилиндрических объектов.....	178
6.2 Самодвижущийся тепловой дефектоскоп для ТНК плоских крупногабаритных изделий.....	183
6.3 Роботизированные системы ТНК с комбинированными источниками нагрева на базе оптических и УЗ излучателей.....	187
6.4 Стационарные и портативные тепловые дефектоскопы с оптическими источниками нагрева для ТНК изделий по отдельным зонам	192
6.5 Стационарная и портативная установки ТНК на базе источников УЗ стимуляции.....	199
6.6 Роботизированные установки комплексного НК.....	205
6.7 Выводы по Главе 6	209
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	210
СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ.....	212
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ.....	219

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	220
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Патенты на изобретение устройств и способов, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ	250
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты об использовании результатов диссертационной работы, отзывы на работу	283
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Разработанные методики проведения ТНК	298

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационных исследований обусловлена следующими факторами:

1) отечественная промышленность испытывает необходимость в разработке новых методов неразрушающего контроля (НК) ответственных изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и металлов, в том числе, изготовленных с применением аддитивных технологий, а также теплозащитных покрытий, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике, дефекты в которых не выявляются или выявляются с трудом стандартными ультразвуковым (УЗ), рентгеновским (РК) и другими видами НК;

2) обеспечение высокой производительности и надежности неразрушающих испытаний, в особенности, крупногабаритных и серийных изделий авиационной и ракетно-космической техники, требует разработки роботизированных комплексов НК, пригодных для применения как в условиях производства вышеупомянутых изделий, так и в процессе их эксплуатации;

3) наличие человеческого фактора в процедурах неразрушающих испытаний и обработки результатов контроля, приводящего к возможным пропускам критичных дефектов, требует повышения уровня автоматизации процедур дефектоскопии и дефектометрии, что также обеспечит повышение производительности и повторяемости получаемых результатов;

4) тепловой неразрушающий контроль (ТНК), доказавший свою эффективность при испытаниях ПКМ, теплозащитных покрытий и тонкостенных металлических изделий, характеризуется слабой проработкой аспектов практического применения как в условиях производства изделий высокотехнологичной техники, так и в процессе их эксплуатации.

Настоящая диссертационная работа направлена на совершенствование теории и методологии ТНК многослойных композитных структур, включая расширение номенклатуры практических источников тепловой стимуляции и их гибридизацию, а также на разработку оригинальных дефектоскопических устройств и

программных алгоритмов автоматизированных процедур дефектоскопии и дефектометрии.

Таким образом, в работе сделан акцент на применение ТНК с целью решения вышеуказанных общих проблем НК материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники, включая решения следующих частных проблем ТНК:

1) низкая эффективность ТНК окрашенных изделий, например, элементов авиационной техники, а также стеклопластиковых изделий без окраски при использовании оптических источников нагрева;

2) отсутствие методологических решений высокопроизводительного ТНК крупногабаритных изделий авиационной и ракетно-космической техники для эффективного выявления внутренних дефектов;

3) разработка отечественных тепловых дефектоскопов, пригодных для практического применения, является нерешенной проблемой ТНК, особенно актуальной в условиях ограниченного доступа к зарубежному оборудованию;

4) идентификация дефектов различных типов, характерных для ПКМ, например, ударных повреждений, трещин и расслоений, требует использования определенных типов источников тепловой стимуляции и проведение контроля в несколько этапов, что повышает трудоемкость контроля;

5) анализ большого количества тепловых изображений (до нескольких тысяч) с целью обнаружения дефектов и определения их параметров в «ручном» режиме связан с высокими трудозатратами и вероятностью пропуска критичных дефектов, что стимулирует использование искусственного интеллекта (нейронных сетей) для обработки данных.

Степень разработанности темы исследования

Наибольшее развитие активный ТНК, с точки зрения практического применения в авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности, получил в зарубежных научно-исследовательских и промышленных организациях. Известной зарубежной научной группой, разрабатывающей все аспекты ТНК, является коллектив лаборатории Х. Maldaque (Университет Лавалья, Канада).

Основной акцент в исследованиях данной группы сделан на алгоритмы обработки данных, в том числе, в автоматизированных системах контроля с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС); известны также работы группы X. Maldague и др. по применению роботизированных установок для ТНК протяженных объектов из ПКМ. Научная группа P. Servais (NDTPro, Бельгия) создала сканирующую роботизированную установку ТНК для обнаружения дефектов крупногабаритных изделий конической формы. Разработки в области автоматизированных алгоритмов обработки последовательностей инфракрасных (ИК) термограмм, в том числе, с использованием ИНС и роботизированных сканирующих систем, выполнены в лаборатории M. Omar (Университет Халифа, ОАЭ). Акцент на теоретические аспекты активного ТНК, а именно, исследования процессов теплопроводности в телах с дефектами, сделан группой J.-C. Vatsale (Университет Бордо, Франция), дочерняя группа этой лаборатории, под руководством С. Pradere, занимается разработкой нового метода ТНК - терагерцовой ИК термографией, применимого для целей спектроскопии и НК стеклопластиковых ПКМ. Недавно возникшей, но заметной научной группой является группа профессора H. Zhang (Харбинский университет технологи, Китай), исследования которой направлены на развитие метода тепловой томографии и синтез данных терагерцового и теплового видов НК. Тепловой контроль качества металлических литых изделий с использованием индукционного нагрева разрабатывает научная группа под руководством В. Oswald-Tranta (Университет Леобен, Австрия). Высокую публикационную активность в области ТНК качества предметов искусства проявляют P. Bison (Институт технологии конструкций, Италия) и S. Sfarra (Университет Аквилы, Италия). Наиболее заметным американским исследователем и предпринимателем, создавшим коммерческую фирму по разработке и производству устройств активного ТНК в интересах авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности, является S. Shepard (Thermal Wave Imaging, США). Известным специалистом в области практического применения активного ТНК в космической отрасли США является D. Burleigh. Активный ТНК композитов в ракетно-космической отрасли

разрабатывает группа А. Siddiqui (Лаборатория передовых систем, Индия). Среди многочисленных немецких научных групп, занимающихся развитием ТНК, следует отметить научную группу С. Maierhofer (Федеральный институт исследования материалов, Германия), а среди коммерческих организаций, занимающихся разработкой тепловых дефектоскопов портативного и роботизированного типов - фирму Automation Technology (Германия). На российском рынке проявляла активность фирма Orgal (Израиль), устройства которой применяют для контроля качества ПКМ авиационной и ракетно-космической техники.

Среди отечественных ученых в области ТНК следует выделить научную группу О.Н. Будаина и С.О. Козельской (АО «ЦНИИСМ», г. Хотьково), разрабатывающих способы и устройства контроля качества композиционных изделий ракетно-космической техники. В течение длительного периода М.И. Щербаков (ООО «ИРТИС/IRTIS», г. Москва) разрабатывал концепцию применения оригинального отечественного тепловизора «ИРТИС» в НК и технической диагностике. Существенный задел в части разработки систем ТНК крупногабаритных изделий из ПКМ сделан И.О. Котовщиковым (ООО «Локус», г. Санкт-Петербург). Научная группа под руководством профессора В.Н. Чернышова (ТГТУ, г. Тамбов) занимается разработкой теплофизических аспектов ТНК, включая алгоритмы автоматизированной обработки данных. О.А. Плехов, А.Ю. Изюмова (ПФИЦ УрО РАН, ИМСС УрО РАН, г. Пермь) и Е.А. Мойсейчик (БНТУ, г. Минск) исследуют возможности ИК термографии при анализе процессов упруго-пластического деформирования и разрушения материалов. Исследования в области активного ТНК авиационных ПКМ и покрытий проводит группа Г.П. Батова (НУЦ «Качество», г. Москва) и А.Б. Корнилова (ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский). Тепловизионную диагностику ограждающих конструкций зданий и сооружений развивает Е.В. Абрамова (НИИСФ РААСН, г. Москва). Различные применения ИК термографии на железнодорожном транспорте разрабатывает А.В. Лукьянов с сотрудниками (ИрГУПС, г. Иркутск). Крупная российская научная группа в области активного ТНК, руководимая В.П. Вавиловым (ТПУ, г. Томск), за последнее десятилетие

сместила акцент исследований с теоретических аспектов ТНК в область его практического применения. Это отразилось в разработке и создании устройств активного ТНК изделий из ПКМ, а также металлических изделий с различного рода покрытиями в интересах промышленных предприятий. Исследования группы В.П. Вавилова были обобщены в ряде кандидатских диссертаций, а также в настоящей докторской диссертации.

Защищаемая диссертационная работа является логическим продолжением исследований, ранее выполненных А.О. Чулковым в рамках кандидатской диссертации и содержит результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности в области активного ТНК, полученные в Томском политехническом университете, а также в ходе трех научных стажировок: в Университете Бордо (Франция) в научных группах J.-C. Batsale (2015 г.) и С. Pradere (2019 г.); в Университете Халифа (ОАЭ) в лаборатории М. Omar (2018 г.); в Университете Леобен (Австрия) в научной группе В. Oswald-Tranta (2019 г.). Основная часть научных результатов, вошедших в настоящую диссертационную работу, была выполнена в рамках проектов, в которых А.О. Чулков являлся руководителем, а именно, в рамках трех проектов, поддержанных РНФ; одного проекта, поддержанного РФФИ; двух проектов по Государственному заданию «Наука»; двух проектов в рамках стипендии Президента РФ для молодых ученых; исследовательского проекта «УМНИК». Кроме того, часть результатов диссертационной работы была получена в ходе выполнения проектов РНФ, РФФИ, Государственного задания «Наука», а также ряда контрактов с промышленными предприятиями авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности, в которых Соискатель являлся основным исполнителем.

Решаемая научная проблема

Диссертация направлена на решение крупной научной проблемы неразрушающего контроля качества современных многослойных материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники, имеющей важное

хозяйственное значение и связанной с разработкой новых, научно обоснованных технологических решений.

Объект исследования: изделия из монолитных угле- и стеклопластиковых ПКМ различной геометрической формы; композиционные сотовые панели; многослойные структуры типа металл-теплозащита; металлические лопатки газотурбинных двигателей.

Предмет исследования: нестационарные процессы теплопередачи в твердых многослойных телах; математические алгоритмы обработки последовательностей тепловых изображений, включая использование ИНС; методики и принципы построения приборов активного ТНК.

Цель исследования: разработка ориентированных на практическое применение способов, методик, программных алгоритмов и аппаратуры активного ТНК, обеспечивающих достоверное обнаружение и определение параметров скрытых дефектов композитных материалов и многослойных структур с высокой производительностью и в автоматизированном режиме.

Задачи исследования

- Разработать способ и соответствующую методику ТНК, обеспечивающие обнаружение структурных неоднородностей в изделиях из ПКМ, поверхность которых характеризуется существенным уровнем температурных шумов в силу неоднородной структуры поверхности и коэффициента излучения, а также материалов, полупрозрачных в видимом диапазоне спектра излучения.

- Разработать программный модуль с использованием алгоритмов на базе ИНС для автоматизированной обработки результатов ТНК изделий из ПКМ и провести его апробацию на контрольных образцах с целью обнаружения имитаторов дефектов производственного и эксплуатационного типов, определения их глубины залегания, толщины, поперечных размеров и координат.

- Разработать способ и соответствующую методику комбинированного ТНК, обеспечивающие обнаружение характерных для ПКМ дефектов, а именно, ударных повреждений, трещин и расслоений в течение одной процедуры контроля.

- Разработать способ и соответствующую методику ТНК крупногабаритных изделий плоской и цилиндрической формы, изготовленных из монолитных ПКМ и многослойных структур типа металл-теплозащита, обеспечивающие высокую производительность сплошного контроля (не ниже 10 м² в час).

- Разработать портативные и стационарные, в том числе роботизированные устройства ТНК изделий из ПКМ, металла, сотовых и многослойных структур типа металл-теплозащита, имеющих различные геометрические формы и габаритные размеры, пригодных для применения в промышленности.

Научная новизна диссертационного исследования

Соискателем впервые предложены новые способы ТНК и процедуры обработки температурных данных, основанные на теоретических расчётах (математическом моделировании) и подтвержденные экспериментальным путем. Соответствующие пункты научной новизны приведены ниже.

- Установлено, что предложенный способ тепловизионного сканирования при неразрушающих испытаниях крупногабаритных цилиндрических и плоских изделий из ПКМ и многослойных структур типа металл-теплозащита обеспечивает производительность сплошного ТНК до 25 м² в час, а применение разработанных методики и программного модуля позволяет получить результаты контроля в виде панорамных изображений.

- На основе разработанного программного модуля для численного моделирования процедур ТНК с импульсами нагрева и принудительного охлаждения, а также экспериментальных данных, установлено, что импульс принудительного охлаждения, примененный после импульса основного нагрева, снижающий температуру контролируемой поверхности до исходной в момент максимума температурного сигнала обнаруживаемого дефекта, обеспечивает повышение температурного контраста до 10-ти раз, а отношения сигнал/шум до

2 - х раз при ТНК изделий, характеризующихся уровнем температурного шума выше 5 %.

- Установлено, что применение в процедурах ТНК конвективных и контактных источников нагрева обеспечивает обнаружение структурных неоднородностей в изделиях из ПКМ, характеризующихся частичной или полной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения и коэффициентом поглощения поверхности ниже 0,7.

- Установлено, что разработанные автоматизированные алгоритмы на базе ИНС, обученные на профилях температуры по времени, обеспечивают обнаружение дефектов, определение их глубины залегания с погрешностью до 16 %, площади и координат с погрешностью до 26 %, толщин с погрешностью до 65 %, а также классификацию дефектов по типам.

- Предложено последовательное использование оптического и УЗ источников тепловой стимуляции, а также комбинирование полученных результатов, что позволило в течение одной процедуры ТНК обнаруживать характерные для ПКМ дефекты в виде ударных повреждений, трещин и расслоений.

Новизна полученных научных результатов подтверждена 2-я патентами на способы ТНК, а также публикациями в высокорейтинговых журналах, которые приведены в Приложении А диссертации и списке основных опубликованных работ.

Теоретическая значимость работы

На основе численных решений трехмерных задач ТНК проанализированы эффекты теплопередачи в твердых телах со структурными неоднородностями, в результате чего предложены новые процедуры ТНК, основанные на особенностях поведения температурных сигналов в дефектных зонах, учитывающие полупрозрачность исследуемых материалов и знакопеременную тепловую стимуляцию. Теоретические решения задач теплопроводности положены в основу процедур обработки температурных данных перед их использованием в обучении ИНС, что улучшило идентификацию и определение параметров скрытых дефектов.

Практическая значимость работы

Разработаны пять модификаций портативных тепловых дефектоскопов, реализованных на базе оптических и конвективных источников нагрева для проведения ТНК в классической односторонней процедуре, а также соответствующие способы ТНК. Одна из модификаций тепловых дефектоскопов вошла в 100 лучших изобретений России в 2019-2020 гг.

Разработан роботизированный дефектоскоп для комбинированного ТНК изделий из ПКМ, а также роботизированное устройство для ТНК теплозащитных покрытий крупногабаритных цилиндрических изделий способом тепловизионного сканирования. Устройство внедрено предприятием АО «Красмаш» (г. Красноярск) (работы выполнены совместно с ООО «УРТЦ «Альфа-Интех», г. Челябинск).

Разработан самодвижущийся тепловой дефектоскоп, предназначенный для ТНК плоских горизонтально ориентированных крупногабаритных изделий из ПКМ и металлов способом тепловизионного сканирования.

Разработана стационарная установка для ТНК изделий из ПКМ способом тепловизионного сканирования и внедрена предприятием АО «Композит» (г. Королев).

Разработана методика ТНК производственных дефектов в композиционных заготовках первого российского цельнокомпозитного самолета ТВС - 2ТДС, которая внедрена ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» (г. Новосибирск).

Разработаны стационарная и переносные установки термоакустического контроля (теплового контроля с УЗ стимуляцией) трещин металлических лопаток турбин и рабочих лопаток вентилятора газотурбинных двигателей, а также соответствующие методики ТНК, внедренные предприятиями ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск) и АО «Авиадвигатель» (г. Пермь).

Стационарная установка термоакустического контроля дефектов полимерных композиционных материалов авиационной и космической отраслей промышленности, а также соответствующая методика ТНК разработаны для ООО «НТЦ «Эталон» (г. Санкт-Петербург) и внедрены предприятием АО «НПО Энергомаш» (г. Москва) в составе комплекса НК.

Практическая ценность и реализуемость полученных результатов также подтверждена 9-ю патентами на устройства ТНК, а также 11-ю свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ, которые приведены в Приложении А диссертации.

Роботизированные и самодвижущиеся тепловые дефектоскопы, модификации портативных тепловых дефектоскопов, установка комбинированного ТНК, а также программные модули автоматизированной обработки данных, используются в образовательном процессе и научно-исследовательской деятельности в ТПУ (г. Томск).

Использование результатов настоящих диссертационных исследований подтверждено актами, а значимость работы подтверждена соответствующими отзывами, приведёнными в Приложении Б диссертации.

Методологические основы и методы исследования

Результаты диссертационного исследования были достигнуты, используя известные способы активного ТНК, применяемые в России и за рубежом, а также используя оригинальные результаты, основанные на особенностях теплопередачи в твердых телах. Численное и аналитическое моделирование, предшествующее экспериментальным исследованиям, было проведено с использованием коммерческих программных продуктов Matlab, Comsol Multiphysics, а также программного обеспечения ThermoCalc-3D Pro и программных модулей ThermoCalc_НС и ThermoSon, разработанных в ТПУ (г. Томск). Экспериментальные исследования были проведены с использованием современного тепловизионного оборудования мирового уровня, а также с использованием источников тепловой стимуляции 4-х типов, а именно, оптических, конвекционных, ультразвуковых и контактных. Исследования проводили как в классических одно- и двухсторонней процедурах ТНК, так и путем реализации разработанных способов тепловизионного сканирования и комбинированного ТНК. Обработку результатов ТНК, представляющих собой последовательности ИК термограмм, проводили с помощью разработанного в ТПУ программного

обеспечения ThermoFit Pro, а также разработанных программных модулей Thermo_NN, ThermoScan, ThermoFusion, Thermo_Visual. В частности, для обработки данных были использованы пространственная и временная фильтрации, преобразование Фурье, метод анализа главных компонент (МАГК), метод термографической обработки сигнала (МТОС) и алгоритмы на базе ИНС, а также программные алгоритмы пространственной сшивки и синтеза данных. Полученные при тепловизионной регистрации температурные данные анализировали по критериям отношения сигнал/шум, дифференциальных температурных сигналов и контрастов.

Положения, выносимые на защиту

- Способ тепловизионного сканирования обеспечивает производительность ТНК крупногабаритных плоских и цилиндрических изделий до 25 м² в час, а также получение результатов контроля в виде панорамных изображений, характеризующихся большей равномерностью температурного поля, чем термограммы, полученные при классической односторонней процедуре ТНК по отдельным зонам. Чередование областей контроля при ТНК крупногабаритных изделий способом тепловизионного сканирования снижает неравномерность температурного поля и повышает достоверность испытаний.

- Применение после основного импульса нагрева импульса принудительного охлаждения, снижающего температуру контролируемой поверхности до исходной в момент максимума температурного сигнала обнаруживаемого дефекта, обеспечивает повышение температурного контраста до 10-ти раз, а отношения сигнал/шум до 2-х раз при ТНК изделий, характеризующихся уровнем температурного шума больше 5 %.

- Применение в процедурах ТНК конвективных и контактных источников нагрева обеспечивает обнаружение структурных неоднородностей в изделиях из ПКМ, характеризующихся полной или частичной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения и коэффициентом поглощения поверхности ниже 0,7.

- Использование алгоритмов на базе ИНС, обученных на профилях температуры по времени, обеспечивает в автоматизированном режиме дефектоскопию, а также дефектометрию с допустимой на практике погрешностью.

- Комбинирование оптического и УЗ источников тепловой стимуляции с последующим синтезом карт дефектов повышает достоверность обнаружения характерных для ПКМ структурных несплошностей в виде ударных повреждений, трещин и расслоений за счет взаимодополняющего характера результатов, полученных с применением различных источников тепловой стимуляции.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов подтверждается использованием методов и процедур ТНК, принятых международным научным сообществом и не противоречащих общепринятым научным положениям, а также данными, полученными другими авторами и опубликованными в соответствующих научных работах; использованием коммерческого программного обеспечения высокого уровня, предназначенного для численного моделирования задач математической физики; использованием современного оборудования мирового уровня, в частности, тепловизоров, источников нагрева, роботизированной и компьютерной техники; соответствием экспериментальных данных результатам математического моделирования. Результаты в части дефектоскопии и дефектометрии подтверждаются испытаниями контрольных образцов, разработанных при непосредственном участии Соискателя, а также результатами применения альтернативных видов НК, в том числе, полученными промышленными заказчиками в рамках выполнения НИОКР.

Личный вклад Соискателя заключается в формулировании научной проблемы и цели исследования, реализации методологических и аппаратных решений задач исследования, в частности, по: 1) контролю качества ПКМ, характеризующихся частичной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения, а также материалов, имеющих существенную неоднородность коэффициента излучения поверхности; 2) контролю качества крупногабаритных

изделий плоской и цилиндрической формы; 3) комбинированному ТНК дефектов производственного и эксплуатационного типов, характерных для изделий из ПКМ, в том числе, сложной геометрической формы; 4) разработке и реализации автоматизированной обработки данных с применением алгоритмов на базе ИНС.

Соискателем лично проведены основополагающие экспериментальные исследования и математическое моделирование тепловых процессов. Технические решения, реализованные в устройствах ТНК, в частности, конструкции тепловых дефектоскопов самодвижущегося типа, компоновка и архитектура установок стационарного, портативного и роботизированного типов были предложены Соискателем. Личный вклад Соискателя подтверждается соавторством в опубликованных работах и зарегистрированных результатах интеллектуальной деятельности.

Апробация работы

Полученные научные результаты были представлены на международных конференциях: QIRT-Asia 2023 (ОАЭ, г. Абу-Даби); QIRT-Asia 2019 (Япония, г. Токио); QIRT - 2018 (Германия, г. Берлин); на международной конференции Thermosense (г. Анахайм, США, 2017 г.); в рамках деловых программ международного военно-технического форума «Армия» в 2021 – 2024 гг.; международного форума «Территория NDT» в 2021 - 2024 гг.; на Всероссийской конференции «ТестМат», проводимой ФГУП «ВИАМ», в 2018, 2021 и 2024 гг.

Разработанные опытные образцы портативных, самодвижущихся и роботизированных устройств активного ТНК были представлены в качестве экспонатов на международных выставках и форумах: «Армия» в 2016, 2021 – 2024 гг., «МАКС» в 2017, 2019 и 2024 (в онлайн формате) гг., а также на выставках при форуме «Территория NDT» Российского общества неразрушающего контроля в 2017, 2018, 2020 - 2024 гг.

Внедрение результатов диссертационной работы заключалось в поставке устройств, соответствующих методик и программных модулей на промышленные предприятия высокотехнологичных отраслей промышленности.

Связь диссертационного исследования с научно-техническими проектами

Результаты диссертационных исследований были получены в ходе выполнения следующих научных проектов и контрактов с промышленными предприятиями в период с 2014 по 2024 гг. при непосредственном руководстве Соискателя (пп.1 - 11) и при участии Соискателя в качестве основного исполнителя (пп.12 - 26):

1. «Разработка научно-технических основ комплексного анализа качества композиционных материалов». Государственное задание «Наука» №5.0005.ГЗБ.2023.

2. «Разработка методологических и аппаратных основ теплового неразрушающего контроля композиционных авиационных материалов в режиме непрерывного линейного сканирования». РНФ №22-29-01469.

3. «Разработка высокопроизводительной самоходной аппаратуры ТНК полимерных композиционных материалов авиакосмического профиля, а также алгоритмов автоматизированной обработки результатов испытаний при непрерывном сканировании». Стипендия Президента РФ (СП-2305.2021.1).

4. «Теоретическое моделирование и экспериментальные исследования нестационарных трехмерных тепловых полей в анизотропных композиционных материалах, используемых в авиакосмической технике, для дефектоскопии и дефектометрии скрытых дефектов». РФФИ №19-29-13004.

5. «Разработка методики и программных алгоритмов активного теплового неразрушающего контроля изделий сложной формы из композиционных материалов с использованием искусственного интеллекта и роботизированной техники». РНФ №19 - 79-00049.

6. «Разработка методик и аппаратуры активного теплового контроля материалов и изделий авиакосмической и ракетной отраслей». ТПУ ВИУ-ИШФВП-196/2019.

7. «Разработка методов и аппаратуры активного ТНК материалов и изделий авиакосмической отрасли». ТПУ ВИУ-ИШФВП-304/2018.

8. «Разработка методов инфракрасной термографии нестационарных физических процессов в твердых телах с высокоскоростной коммуникацией». Государственное задание «Наука» №8.13264.2018/8.9.

9. «Разработка метода неразрушающего контроля крупногабаритных элементов ракетной техники с применением активной инфракрасной термографии и тепловой томографии». Стипендия Президента РФ (СП-1286.2018.1).

10. «Разработка методики и программного обеспечения инфракрасного термографического контроля изделий из композиционных материалов авиационной и ракетно-космической отрасли с автоматизированной идентификацией дефектов». РФФ №17-79-10143.

11. «Разработка мощного светодиодного источника нагрева для портативного теплового дефектоскопического аппарата». Программа «УМНИК» №5076 ГУ1/2014.

12. «Разработка научных основ технологии роботизированной мультипараметрической томографии на основе методов обработки больших данных и машинного обучения для исследования перспективных композиционных материалов». Государственное задание «Наука» №5.0017.ГЗБ.2020.

13. «Разработка методических, программных и аппаратных основ автоматизированного теплового неразрушающего контроля композиционных материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники». РФФ №22 - 19 - 00103.

14. «Разработка метода и аппаратуры динамической тепловой томографии композиционных материалов». РФФ №17-19-01047.

15. «Развитие научных основ проектирования и диагностики углепластиковых композитов на основе исследования взаимосвязи их структуры и динамических характеристик с использованием комплексного расчетно-экспериментального подхода, включающего сканирующую лазерную виброметрию и численное моделирование». РФФИ №18-41-703002.

16. «Изготовление и поставка стационарной установки термоакустического контроля дефектов полимерных композиционных материалов». Контракт с ООО «НТЦ «Эталон» №16.02.03-157/2024у.

17. «Отработка термоакустического метода контроля полый широкохордной РЛВ двигателя ПД-14, разработка оборудования для термоакустического контроля полый широкохордной РЛВ двигателя ПД-14 в условиях эксплуатации и ремонта». Контракт с АО «Авиадвигатель» № 16.02.03-131/2023.

18. «Разработка методического руководства и внедрение термографического метода неразрушающего контроля с ультразвуковой стимуляцией нагрева для выявления трещин в лопатках турбины из жаропрочного никелевого сплава. Разработка, изготовление и поставка установки для проведения термографического метода неразрушающего контроля с ультразвуковой стимуляцией нагрева». Контракт с ПАО «ОДК-Сатурн» №16.02.03-242/2022.

19. «Формирование исходных технических требований, разработка и создание системы дистанционного ТНК лазерной резки газодиффузионных машин». Контракт с АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» № 226/3903-Д/16.02.03-363/2021.

20. «Применение методов тепловизионной диагностики для обнаружения внутренних дефектов и ударных повреждений в композитных образцах». Контракт с ФАУ «ЦАГИ» № 17705596339190002180/16.02.03-212/2021.

21. «Исследование уровня повреждений КПО угле- и стеклопластиков методом ИК-термографии». Контракт с ФАУ «ЦАГИ» № 5-527/16.

22. «Исследования и консультационное обслуживание по разработке техники передового термографического неразрушающего контроля». Контракт с Лабораторией передовых систем (Индия) №34/63.

23. «Разработка и поставка аппаратно-программного модуля бесконтактного контроля изделий цилиндрической формы». Контракт с ООО УРТЦ «Альфа-Интех» №16.1-105/2017.

24. «Разработка методики применения активного ТНК с использованием оптических и ультразвуковых стимуляций для оперативной дефектоскопии

элементов конструкций МВЛ сложной формы из углепластика на этапе их производства». Контракт с ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» №16.15-358-2017.

25. «Установка «Термоскоп-К» для анализа дефектности тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов». Контракт с АО «Композит» № 5-548/16.

26. «Неразрушающий контроль авиационных и космических материалов методом активной количественной инфракрасной термографии». Контракт с ООО «Солютерм» (бывший российский представитель корпорации Airbus), № 5-285.14.

Публикации по теме диссертации

Соискателем по теме диссертации опубликовано 158 научных статьи, 74 из которых - в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, включая 38 публикаций в журналах 1-го и 2-го квартилей. Кроме того, список опубликованных работ Чулкова А.О. включает 22 патента на устройства и способы, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Индекс Хирша Соискателя по базе Scopus – 15.

Структура и объем диссертационных исследований

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, списка цитируемой литературы, а также включает 3 Приложения. Объем диссертации составляет 321 страницу, включает 85 рисунков (в том числе 5 рисунков Приложения В), 28 таблиц, 25 формул и 270 библиографических источников.

Благодарности

Соискатель выражает глубокую благодарность научному консультанту - заслуженному деятелю науки РФ, профессору, д.т.н. В.П. Вавилову за сопровождение работы, сотрудникам Научно-производственной лаборатории «Тепловой контроль», В.В. Ширяеву за содействие в проведении экспериментальных исследований, Д.А. Нестеруку за программную реализацию предложенных алгоритмов обработки данных, А.И. Суппесу за техническую

реализацию разработанных устройств, М.С. Суханову за программную реализацию алгоритмов численного моделирования, аспирантам А.И. Московченко, Б.И. Шагдырову, Д.Ю. Кладову, В.И. Стасевскому за помощь в подготовке контрольных образцов, трехмерном моделировании конструкций дефектоскопов, обучении ИНС, проведении экспериментальных исследований, а также всем коллегам в ТПУ, которые внесли свой вклад в выполнение настоящей работы.

Особую благодарность Соискатель выражает своей семье, поддержка которой способствовала проведению научных исследований и являлась стимулом к получению новых результатов.

ГЛАВА 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ИСТОРИИ И СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Тепловой неразрушающий контроль в течение нескольких десятилетий, в частности, в России, не имел широкого применения в сравнении с такими утвердившимися в промышленности видами НК как РК, УЗ контроль, магнитопорошковый, вихретоковый и контроль проникающими веществами. Ситуация существенно изменилась в последние две декады, когда к ТНК появился повышенный интерес со стороны авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности. Этому способствовали три фактора: 1) активное применение ПКМ в производстве различного рода несущих конструкций и обшивок корпусов, характерные дефекты которых сложно обнаружить с использованием вышеупомянутых видов НК, но эффективно выявляемые с помощью различных способов ТНК; 2) развитие тепловизионной техники, в частности, появление компактных тепловизионных модулей, с относительно высокими пространственным разрешением и температурной чувствительностью; 3) появление коммерческих тепловых дефектоскопов зарубежного производства, пригодных для ТНК изделий из ПКМ различных размеров и геометрических форм.

Ряд обзорных научных статей и монографий, опубликованных в последние годы, а также диссертации на тему ТНК, довольно подробно описывают историю достижений, современное состояние и тенденции развития ТНК [1-8]. Настоящая Глава, в определенной степени, является кратким обобщением вышеуказанных работ и дополнена актуальными данными.

1.1 Предыстория развития ТНК

Научно-технический и социальный запрос на разработку видов НК, а также соответствующих устройств возник в связи с началом массового промышленного производства материалов и изделий, что потребовало обеспечения контроля их качества, как на стадии производства, так и эксплуатации. В основе каждого

вида НК лежат определенные физические принципы, включающие использование волновых полей и частиц различной природы. В основе ТНК лежит анализ температурных полей поверхности объекта исследования, возмущаемых нестационарными тепловыми потоками в результате внешнего или внутреннего, теплового или механического возбуждения соответствующими техническими устройствами – источниками тепловой стимуляции. Под воздействием такой стимуляции «бездефектное» тело характеризуется регулярным тепловым потоком и соответствующим регулярным температурным полем, возмущения которого могут быть вызваны наличием дефектов различной физической природы (согласно ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения», дефектом называется каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией). Температурные поля поверхности объекта исследования регистрируют с помощью тепловизора и в дальнейшем анализируют с целью обнаружения дефектов (дефектоскопии) и определения их параметров (дефектометрии). Таким образом, этапы развития ТНК связаны с фундаментальными исследованиями в области теории теплопроводности, а также прикладными исследованиями в области разработки приемников ИК излучения, источников тепловой стимуляции и программных алгоритмов обработки данных.

Принято считать, что тепловое излучение было открыто W. Hershel в 1800 г., а математические основы теории теплопередачи были заложены J. Fourier и М.А.А. Angstrom в 19-м веке [9-11]. Базовые идеи анализа температурных данных в частотной и/или временной областях, направленные на снижение шумов и помех, с использованием преобразований Фурье и Лапласа продолжают широко применяться в современной реализации ТНК. Развитие ИК приемников и тепловизионной техники во многом связано с военными разработками, проводимыми передовыми в техническом плане странами, начиная со второй половины 20-го века.

Тепловой неразрушающий контроль по принципам реализации разделяют на пассивную и активную процедуры. Активная процедура ТНК, в отличие от пассивной, которая напрямую связана с тепловидением, заключается в регистрации

температурных полей контролируемой поверхности и применении внешних источников тепловой стимуляции, выводящих объект контроля из термодинамического равновесия.

Рассматривая пассивные процедуры ТНК, можно считать, что первые примеры гражданского применения этого метода были предприняты в 19-м веке. В частности, после крушения лайнера «Титаник», L. Bellingham в 1915 г. запатентовал ИК приемник «Infrared Eye» для обнаружения айсбергов, пароходов и других холодных или горячих объектов на расстоянии [12], R. Parker в это же время запатентовал «Термические весы или радиометр» [13], G. Barker в 1934 г. предложил использовать ИК приемники для обнаружения лесных пожаров, а D. Nichols в 1935 г. применил приемник ИК излучения для анализа температурных полей горячекатаных металлических листов [14, 15]. Первые исследования теплофизических характеристик (ТФХ) материалов путем анализа нестационарных тепловых процессов были проведены P. Vernaute в 1937 г. [16]. Начиная со второй половины 20-го века, во многом благодаря появлению на рынке коммерческой тепловизионной техники, пассивный ТНК получил широкое применение при обследовании электроустановок, линий электропередач, зданий и сооружений, теплотехнических установок, а также при мониторинге технологических процессов в различных отраслях промышленности [17].

Одним из первых применений активного ТНК были испытания корпуса двигателя ракеты «Polaris», выполненные в 1965 г., в ходе которых поток нагретого воздуха использовали в качестве источника тепловой симуляции [18]. Примерно в тот же период времени, активной процедурой ТНК были проведены испытания тепловыделяющих элементов ядерных реакторов [19]. Следует отметить, что в 1967 г. большая часть докладов на Ежегодной конференции Американского общества НК (ASNT) были посвящены ТНК, однако на европейских конференциях по НК того времени доклады по тепловому контролю были немногочисленными. Начиная с конца 1970-х гг., в США процедуры активного ТНК нашли применение в авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности.

Фундаментальные монографии Н. Carslow и Т. Jaeger [20], а также А.В. Лыкова [21], опубликованные в 1959-м и 1967-м годах, заложили основу теоретических решений задач теплопроводности, на основе которых D. Balageas, В.П. Вавилов и R. Taylor, P. MacLaughlin и H. Mirchandani, Ю.А. Попов и А.Е. Карпельсон и ряд других исследователей ввели понятия одно-, двух- и трехмерных моделей ТНК [22-25]. Таким образом, были объединены исследования в области теории теплопроводности с достижениями в области ИК технологий, в результате чего были созданы условия для внедрения ТНК в промышленность.

Начиная с 2000-х годов, в зарубежных странах значительно расширилось практическое применение ТНК, что связано с появлением промышленных тепловых дефектоскопов. В частности, портативные устройства активного ТНК, разработанные компаниями Thermal Wave Imaging (США), Automation Technology (Германия) и Orgal (Израиль), включающие развитые алгоритмы обработки термографического сигнала, нашли применение при контроле качества авиационных и ракетно-космических ПКМ (более подробно системы ТНК описаны ниже). На российском рынке, до недавнего времени, фактически доступной была только сравнительно простая система NDTherm (Orgal, Израиль), однако, ввиду ограничений конструкции, данное устройство не нашло широкого применения на отечественных промышленных предприятиях.

В последнее десятилетие в России наметилось изменение отношения к ТНК со стороны промышленности, в частности, ТНК уже рассматривается как один из основных видов НК изделий из ПКМ. Кроме того, перспективной тенденцией развития ТНК является его комбинирование с другими видами НК, например, УЗ контролем и РК [26-29]. Определенный стимул к развитию ТНК, также, как и других видов НК, послужило ограничение поставок зарубежных дефектоскопов и ориентация промышленных предприятий на отечественный рынок НК, в том числе, на разработки научно-исследовательских организаций.

1.2 Научные группы, ведущие исследования в области ТНК

В таблице 1.1 перечислены основные мировые научные группы, работающие в области активного ТНК [10-67] (порядок перечисления не связан с численностью коллектива научной группы или ее вкладом в разработку ТНК). Следует отметить, что за последнее время число научных групп, ведущих исследования в области ТНК существенно увеличилось, а ТПУ (г. Томск) продолжает поддерживать связь с представителями большинства перечисленных научных групп, что позволяет определять мировые тенденции развития ТНК и, соответственно, поддерживать высокий уровень отечественных разработок.

Таблица 1.1 – Научные группы, работающие в области активного ТНК (адаптировано из работы [4] и дополнено)

Исследователи (организация, страна)	Направления исследований	Источник
Zalameda J.N., Winfree W., Cramer E. (NASA Langley Research Center, США)	Применение ТНК в авиационной и космической отраслях промышленности, разработка алгоритмов обработки данных.	[30, 31]
Shepard S. (Thermal Wave Imaging, Inc., США)	Разработка и производство серийных тепловых дефектоскопов.	[32-34]
Han X. (Wayne State University, США)	Исследования в области термоакустического контроля.	[35, 36]
Holland S.D. (Iowa State University, США)	Метрология и стандартизация в ТНК.	[37]
Sun J.G. (Argonne National Laboratory, США)	Создание алгоритмов обработки данных ТНК на основе ТФХ материалов.	[38]

Продолжение таблицы 1.1		
Maldague X. (University Laval, Канада)	Разработка алгоритмов обработки данных, роботизация и автоматизация процессов ТНК. Один из наиболее известных мировых экспертов в области ТНК.	[39, 40]
Maev R. (University of Windsor Institute for Diagnostic Imaging Research, Канада)	Исследования в области алгоритмов обработки данных ТНК.	[41]
Maierhofer C. (BAM, Германия)	Теоретические и экспериментальные исследования ПКМ методами ТНК. Наиболее многочисленная группа в Германии.	[42]
Kreutzbruck M. (University of Stuttgart, Германия)	Исследования в области автоматизированных алгоритмов обработки данных ТНК.	[43]
Roche J.-M., Balageas D.L. (ONERA, Франция)	Исследования теплофизических принципов ТНК. Научная группа с многолетней историей.	[44, 45]
Batsale J.-P., Pradere C. (Bordeaux University, Франция)	Теплофизические основы ТНК. Разработка метода терагерцовой ИК термографии.	[46, 47]
Dumoulin J. (Gustave Eiffel University, Франция)	Исследования в области теплообмена в аэродинамических процессах методами ТНК.	[48]
Avdelidis N.P. (University of Cranfield, Великобритания)	Экспериментальные исследования ПКМ методами ТНК.	[49]

Продолжение таблицы 1.1		
Almond D.P., Pickering S.D. (University of Bath, Великобритания)	Теоретические аспекты ТНК, исследования в области термоакустического контроля.	[50]
Oswald-Tranta B. (University of Leoben, Австрия)	Разработки в области ТНК с индукционным видом тепловой стимуляции.	[51]
Mayr G. (Josef Ressel Center for Thermography, Австрия)	Теоретические и экспериментальные исследования ПКМ методами ТНК.	[52]
Panella F.W. (University of Salento, Италия)	ТНК материалов изделий из ПКМ.	[53]
Bison P. (ITC-CNR, Италия)	ТНК объектов искусства, исследования в области обработки данных.	[54]
Meola C., Carlomagno G.-M. (Università di Napoli Federico II, Италия)	Исследования способов тепловой стимуляции, разработка циклического способа нагрева.	[55]
Galietti U. (University of Bari, Италия)	Новые методы обработки данных в ТНК.	[56]
Sferra S. (University of L'Aquila, Италия)	Теоретические и экспериментальные исследования ПКМ и предметов старинны методами ТНК.	[57]
Mendioroz A. (University of the Basque Country, Испания)	Теоретические и экспериментальные исследования в области циклического нагрева при ТНК.	[58]
Usamentiaga R. (University of Oviedo, Испания)	Разработка алгоритмов обработки данных в ТНК.	[59]

Продолжение таблицы 1.1		
Rajic N. (Defence Science and Technology Group, Австралия)	Предложил использовать МАГК в ТНК, ставший одним из основных при обработке данных.	[60]
Tarpani J.R. (University of Sao Paulo, Бразилия)	Применение ТНК при механических испытаниях.	[61]
Steenackers G. (University of Antwerpen, Бельгия)	ТНК объектов наследия и искусства.	[62]
Servais P. (NDT Service Cente, Бельгия)	Разработки роботизированных систем ТНК изделий авиационной и космической техники.	[63]
Świderski W. (Military Institute of Armament Technology, Польша)	Экспериментальные исследования методами ТНК изделий из ПКМ военного применения.	[64]
Nowakowski A., Kaczmarek M. (Gdansk University of Technology, Польша)	Исследования возможностей применения ТНК в области медицины.	[65]
Minkina W. (Czestochowa University of Technology, Польша)	Метрологические аспекты ТНК.	[66]
Wiecek B. (University of Lodz, Польша)	Исследования возможностей применения ТНК в области медицины.	[67]
Švantner M. (University of West Bohemia, Чехия)	ТНК материалов и изделий из ПКМ, разработка программных алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии.	[68]

Продолжение таблицы 1.1		
Omar M. (Khalifa University, ОАЕ)	Разработка автоматизированных и роботизированных систем ТНК. Разработка алгоритмов обработки данных ТНК с использованием ИНС.	[69]
Mulaveesala R. (Institute of Technology Delhi, Индия)	Исследования в области термоволнового метода ТНК и его применение.	[70]
Sakagami T. (Osaka University, Япония)	Исследования в области анализа термоупругих напряжений.	[71]
Morikawa Y. (Tokyo Institute of Technology, Япония)	Применение ИК термографии в биологии, разработка алгоритмов обработки данных.	[72]
Choe M.-Y. (Korea Research Institute of Standards and Science, Корея)	Исследования в области применения ТНК дефектов сотовых авиационных панелей.	[73]
Guo X. (Beihang University, Китай)	Исследования в области применения термоакустического контроля изделий авиационной и космической техники из ПКМ.	[74]
Zhang H. (Harbin Institute of Technology, Китай)	Исследования теоретических аспектов ТНК, разработка алгоритмов обработки данных для дефектоскопии и дефектометрии.	[75]
Будадин О.Н., Козельская С.О. (ЦНИИСМ, Россия)	Многопараметрический мониторинг структурного состояния, тепловая дефектометрия, ТНК сетчатых структур из ПКМ.	[5, 6, 79]

Продолжение таблицы 1.1		
Вавилов В.П., Чулков А.О., Ширяев В.В., Нестерук Д.А. (Томский политехнический университет, Россия)	Разработка методов ТНК материалов и изделий из ПКМ и металлов. Разработка программных алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии, численного моделирования. Автоматизация и роботизация процедур ТНК, разработка оборудования ТНК.	[16-4, 23, 76-78]
Абрамова Е.В. (НИИСФ РААСН, Россия)	Нормативно-методические аспекты и обучение в области ТНК.	[80]
Чернышев В.Н. (Тамбовский технический государственный университет, Россия)	Теплофизические основы ТНК и нестационарные методы измерения теплофизических характеристик.	[81]
Котовщиков И.О. (ООО «Локус», Россия)	Экспериментальные исследования ПКМ методом ТНК, разработка алгоритмов обработки данных.	[82]
Плехов О.А. (ПФИЦ УрО РАН, ИМСС УрО РАН, Россия)	Анализ деформаций и разрушения методом ТНК.	[83]
Студитский А.С. (МНПО «Спектр», Россия)	Разработка тепловизионной техники специального назначения.	[84]
Захаренко В.А. (Омский государственный технический университет, Россия)	Пирометрия и метрология.	[85]
Батов Г.П. (НУЦ «Качество», Россия)	ТНК композитов, сертификация в ТНК.	[86]

Продолжение таблицы 1.1		
Корнилов А.Б., Корнилов Г.А., Казьмин Е.А., Смотров А.В. (ФАУ «ЦАГИ», Россия)	Теоретические и экспериментальные исследования методом ТНК авиационных ПКМ.	[87]
Лукьянов А.В. (ИрГУПС, Россия)	ТНК элементов железнодорожной инфраструктуры.	[88]
Мойсейчик Е.А. (БНТУ, Белоруссия)	Анализ деформаций и разрушения методом ТНК.	[89]

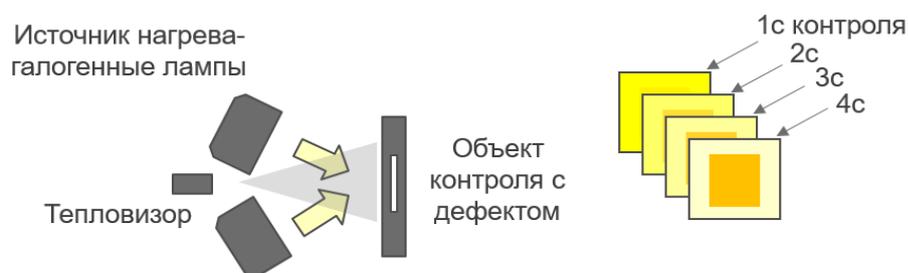
1.3 Процедуры активного ТНК и алгоритмы обработки данных

На рисунке 1.1 показаны процедуры активного ТНК на примере использования оптических и УЗ источников тепловой стимуляции. Классическими процедурами считаются одно- и двухсторонний ТНК (в англоязычной литературе также используют термины «на отражение» и «на просвет» по аналогии с УЗ НК), различающиеся взаимным расположением источников тепловой стимуляции и тепловизора относительно объекта контроля (рисунок 1.1 *а, б*). Суть таких процедур заключается в осуществлении короткого (до 100 миллисекунд) или длинного (до 20 секунд) импульсов нагрева при одновременной регистрации температурных полей с помощью тепловизора. Односторонняя процедура ТНК наиболее эффективна с точки зрения обнаружения дефектов, расположенных вблизи нагреваемой поверхности – так называемых приповерхностных дефектов, а также при оценке их параметров, например, глубины залегания. Двухсторонняя процедура ТНК обеспечивает наилучшее выявление дефектов на всей контролируемой толщине (установлено, что глубина контроля дефектов в ПКМ методами ТНК составляет до 20 мм в зависимости от типа дефекта, его поперечных размеров, ТФХ контролируемого материала, а также длительности, мощности и типа нагрева). При этом, нужно иметь в виду, что при ТНК изделий большой толщины возникает риск повреждения контролируемой поверхности ввиду

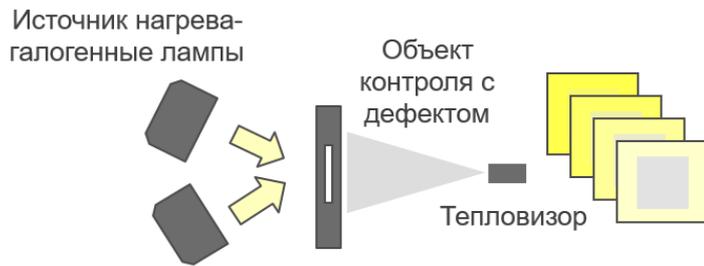
длительного импульса нагрева высокой мощности. Ряд исследований направлен на решение этой проблемы с помощью циклического нагрева и соответствующего частотно-временного анализа данных. Следует отметить, что в большинстве случаев практического применения ТНК возможен только односторонний доступ к объекту исследования.

В качестве источников нагрева по схемам рисунка 1.1 *а, б*, как правило, используют оптические источники, а именно, импульсные ксеноновые лампы с энергией от 4 до 18 кДж в импульсе длительностью от 15 мс, а также галогенные лампы мощностью до 4 кВт. Для исследований ТФХ материалов и контроля тонкостенных структур или покрытий используют мощные лазеры с длительностью импульса от 1 мс, обеспечивающие сравнительно равномерное поле нагрева, но в зоне небольшого размера. Применение конвективных источников нагрева, например, фенов, в одно- и двухсторонней процедурах ТНК сопровождается низкой равномерностью нагрева и, в лучшем случае, обеспечивает выявление обширных дефектов или наличия воды в ячейках сотовых панелей при их значительном заполнении. Применение конвективных источников нагрева наиболее эффективно при их непрерывном перемещении вдоль контролируемой поверхности, тем самым реализуя ТНК способом тепловизионного сканирования. Данная процедура ТНК подразумевает синхронное перемещение тепловизора и источника нагрева, в качестве которого может быть использован, как было отмечено выше, как конвективный нагреватель, так и нагреватель оптического (рисунок 1.1 *в*) или индукционного типов, а результатом испытаний является синтезированная последовательность панорамных термограмм, каждая из которых соответствует определенному времени контроля. Основным преимуществом ТНК способом тепловизионного сканирования является высокая производительность испытаний, что особенно актуально при НК крупногабаритных изделий. Следует отметить, что практическая реализация такого способа ТНК требует применения моторизированных или роботизированных устройств. В настоящей диссертации разработке способа тепловизионного сканирования посвящена Глава 3.

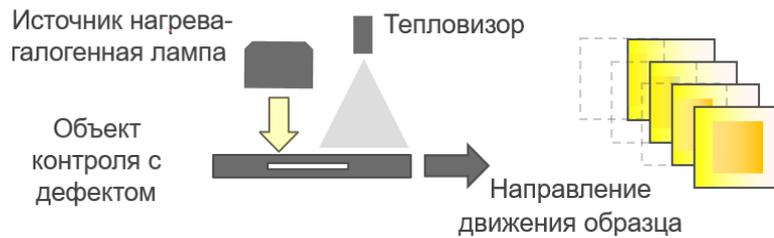
Решение задач НК изделий сложной геометрической формы, изготовленных из ПКМ и металлов, может быть реализовано с помощью термоакустического способа (известного также под названиями «ТНК с ультразвуковой стимуляцией» и «ИК УЗ термография») – процедуры ТНК, в которой в качестве источника стимуляции используют УЗ преобразователь магнитострикционного или пьезоэлектрического типа (схема реализации термоакустического контроля приведена на рисунке 1.1 з). Основное преимущество такого способа ТНК состоит в возможности обнаружения сомкнутых трещин и расслоений, то есть дефектов, не вызывающих заметных изменений ТФХ материала и, соответственно, возмущений температурного поля при использовании других видов тепловой стимуляции по схемам рисунка 1.1 а-в. Наглядность результатов ТНК, полученных термоакустическим способом, обеспечивается тем, что температурная индикация возникает только в зонах дефектов на фоне сохраняющейся исходной температуры поверхности объекта контроля. Такой феномен обусловлен преобразованием механической энергии источника УЗ стимуляции в тепловую энергию в результате внутреннего трения, пластической деформации, механического гистерезиса и эффекта термоупругости в дефектной зоне. Следует отметить, что механизмы локального повышения температуры в зоне дефектов при термоакустическом контроле, а также вероятность локального повреждения объекта контроля в точке ввода УЗ колебаний, до сих пор являются предметом научной дискуссии. В настоящей диссертации описание разработанных в ТПУ (г. Томск) устройств термоакустического контроля, а также полученные с их помощью результаты, приведены в Главе 6.



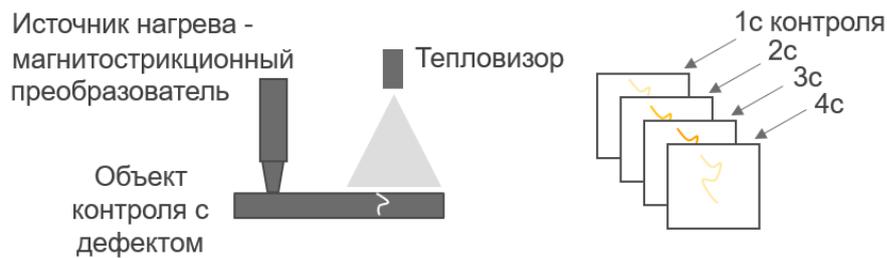
а) схема классической односторонней процедуры ТНК



б) схема классической двухсторонней процедуры ТНК



в) схема контроля способом тепловизионного сканирования



г) схема термоакустического контроля

Рисунок 1.1 – Процедуры ТНК

Несмотря на то, что определяющую роль в обеспечении эффективного ТНК играют корректно выбранные процедура и параметры контроля, алгоритмы обработки данных позволяют обеспечить количественное и качественное улучшение результатов неразрушающих испытаний. Описанию различных математических алгоритмов обработки данных, основанных как на особенностях процесса теплопередачи, так и на математическом анализе изменяющихся во времени процессах различного вида, посвящено большое количество публикаций [1, 27, 32, 35, 45, 47, 56, 71, 90-114]. В таблице 1.2 приведено краткое описание применяемых в ТНК алгоритмов обработки данных.

Таблица 1.2 – Алгоритмы обработки температурных данных, используемые в ТНК (адаптировано из работы [4])

Алгоритм	Описание	Источник
Усреднение температуры во времени	Усреднение белого шума по N термограммам снижает среднюю величину шума в \sqrt{N} раз.	[1]
Двухмерная пространственная фильтрация	Для сглаживания шума используют двухмерные маски размером 3×3 - 7×7 (фильтры Собеля, Гаусса, Лапласа др.).	[1]
Вычитание фона	Вычитание из последовательности термограмм исходных температурных значений (комнатной температуры), что снижает уровень аддитивной составляющей температурного шума.	[1]
Нормализация данных	Деление последовательности термограмм, содержащих сигналы от дефектов, на термограмму без признаков дефектов, снижает уровень мультипликативной составляющей температурного шума.	[90]
Раннее обнаружение	Метод основан на том факте, что диффузия тепла проявляется слабее при малых временах наблюдения, следовательно, дефектные отметки имеют более резкие границы.	[91]

Продолжение таблицы 1.2		
Фурье-анализ, или импульсная фазовая термография	К изменяющимся во времени температурным значениям применяют преобразование Фурье, переводя исходные термограммы в последовательность фазовых изображений (фазограмм).	[92]
Вейвлет-преобразование	Метод подобен преобразованию Фурье, но позволяет локализовать сигналы во времени.	[93]
Преобразование Хью	Обнаружение дефектных областей проводят в системе координат Log-Log, в которой функция температуры в бездефектной зоне имеет вид прямой линии.	[94]
Преобразование Радона	Алгоритм аналогичен преобразованию Хью и не требует выбора бездефектной зоны.	[95]
МАГК	Исходную последовательность термограмм преобразуют в последовательность изображений главных компонент.	[96]
Полиномиальная аппроксимация	Имеющиеся во времени температурные значения аппроксимируют полиномами 3-6 порядка, устраняя высокочастотные шумы.	[97]
МТОС	Преобразование исходной последовательности термограмм в последовательности изображений первой и второй производных от температуры по времени.	[32, 35]

Продолжение таблицы 1.2		
Синхронная термография	Комбинация фототермии и ИК термографии, термоволновой контроль с анализом фазограмм.	[56]
Мультичастотная синхронная термография	Алгоритм обработки данных ТНК, полученных при волновом нагреве и основанный на том, что тепловые волны различной частоты проникают в твердое тело на различную глубину.	[98]
Частотно-модулированная визуализация тепловых волн	Алгоритм определения глубины залегания дефектов за счет частотной модуляции импульсов нагрева, варьирующих глубину проникновения тепловых волн в объект контроля.	[70, 99]
Корреляция	Корреляция изменений температурных сигналов дефектной и бездефектной областей во времени, с целью снижения мультипликативной составляющей температурного шума.	[1]
Динамическая тепловая томография	Обработка последовательностей термограмм с целью распределения выявленных дефектов по слоям контролируемого изделия.	[100]
Трехмерная тепловая томография	Алгоритм, основанный на Байесовской инверсии, позволяет определять ТФХ материала и положение скрытых неоднородностей.	[101]

Продолжение таблицы 1.2		
Синтетическая термография на основе анализа времени распространения тепловых сигналов	Алгоритм ТНК, позволяющий преобразовывать исходные последовательности термограмм в карты глубин дефектов путем анализа точек перегиба на кривых $T(\tau)$.	[102]
Метод восстановленного псевдо-теплового потока	Алгоритм определения толщины покрытия по временному псевдо-профилю пучка при непрерывном лазерном нагреве.	[103]
Термография с использованием синхронного детектирования	Алгоритм основан на принципе синхронного детектирования, в котором в качестве опорного сигнала служит изменение температуры бездефектной зоны объекта контроля. Применяют при механических испытаниях изделий.	[104]
Анализ термоупругих напряжений	Базовая процедура ТНК, предназначенная для анализа распределения напряжений и развития усталостных трещин при механических испытаниях изделий.	[71]
Алгоритмы на базе ИНС	Алгоритмы автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии, основанные на анализе пространственных и временных особенностях температурных сигналов.	[49, 105-108]
Синтез данных	Набор алгоритмов комбинирования результатов различных видов НК с дальнейшим синтезом результирующих карт дефектов.	[27, 45, 109-111]

Продолжение таблицы 1.2		
Параметрическая и непараметрическая реконструкция отдельных термограмм	Применение алгоритма в медицинской диагностике повышает тепловой контраст, например, при ИК термографии вен.	[47]
Анализ коэффициента нелинейных искажений	Алгоритм основан на идее, что наличие дефектов добавляет гармоники высоких частот в спектр Фурье температурных сигналов. Преимущества алгоритма в ТНК не доказаны.	[112]
Метод К-средних	Осуществляют кластеризацию термограммы для характерных точек. Алгоритм чувствителен к шумам, и его преимущества в ТНК не доказаны.	[113]
Подход Тагучи к проектированию тепловых дефектоскопов	Относится к проектированию устройств ТНК. Метод Тагучи включает оптимизацию проектирования на 3-х уровнях: 1) системное проектирование; 2) параметрическое проектирование; 3) проектирование с учетом допусков.	[114]

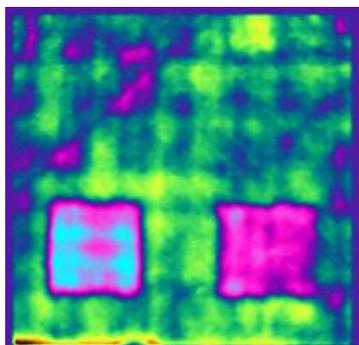
1.4. Области применения и современная аппаратура ТНК

Как и любой другой вид неразрушающих испытаний, ТНК обладает рядом преимуществ и недостатков, которые определяют области его применения. В частности, основным преимуществом ТНК является его высокая производительность, в ряде случаев, сравнимая с производительностью визуального контроля. Возможность проведения ТНК в односторонней процедуре как в классической схеме с распределённым нагревом (схема показана на

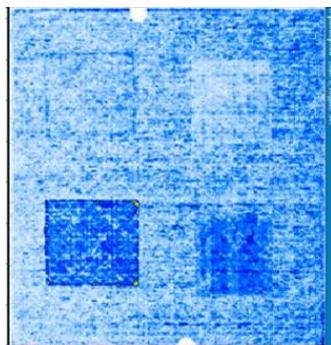
рисунке 1.1*a*), так и способом тепловизионного сканирования (соответствующая схема показана на рисунке 1.1*в*), является несомненным преимуществом ТНК по сравнению, например, с РК. Бесконтактный характер испытаний (за исключением термоакустического способа ТНК, схема которого показана на рисунке 1.1*г*), предъявляющий относительно невысокие требования к качеству контролируемой поверхности, а также отсутствие необходимости использования иммерсионной среды, упрощают процедуру подготовки объекта контроля к испытаниям по сравнению, например, с классическим УЗ НК. Возможность контроля качества материалов, имеющих пористую структуру, например, некоторые виды полимерных теплозащитных покрытий, контроль через воздушную среду, в случае с сотовыми панелями, ячейки которых частично заполнены водой, а также возможность контроля качества тонких структур и обшивок, также являются преимуществами ТНК перед другими видами НК. Однако ввиду специфики физических процессов, лежащих в основе процедур ТНК, основным недостатком данного вида испытаний является относительно малая глубина контроля (не более 20 мм в монолитных ПКМ), относительно низкая вероятность обнаружения дефектов малых размеров (речь идет о расслоениях с поперечными размерами менее 3×3 мм, толщиной менее 0,1 мм и расположенных на глубине от 4 мм при контроле с использованием оптического нагрева), а также относительно высокая погрешность определения толщины дефектов (до 100 % от реальной толщины).

Для сравнения результатов ТНК с результатами РК и УЗ НК на рисунке 1.2 приведены соответствующие карты дефектов пластины из углепластика размерами 350×350 мм и толщиной 2,3 мм. Пластина содержала 4 искусственных дефекта в виде вставок бумаги и полиэтилена размерами 100×100 мм, расположенных на различной глубине (типичные дефекты при изготовлении изделий из композитов с использованием препрегов). Все три вида НК справились с задачей обнаружения вставок из бумаги, однако вставки из полиэтилена удалось обнаружить только с помощью УЗ НК. Для получения приведенных на рисунке 1.2 результатов, длительность процедуры ТНК составила 40 секунд (контроль проводили в односторонней процедуре при оптическом нагреве), УЗ НК был проведен в течение

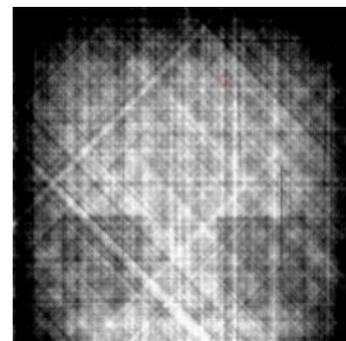
20 минут (при полном погружении объекта контроля в ванну с иммерсионной средой), РК потребовал 1 минуту (контроль проводили в двухсторонней процедуре с соблюдением требований безопасности).



а) результат ТНК



б) результат УЗ НК



в) результат РК

Рисунок 1.2 – Результат НК пластины из ПКМ

Вышеперечисленные преимущества и недостатки ТНК определяют области его применения, которые приведены ниже в порядке уменьшения эффективности метода. Следует отметить, что в списке не приведены частные узкоспециализированные примеры применения ТНК, а акцент сделан на наиболее распространенные задачи НК:

- 1) контроль наличия воды в ячейках сотовых панелей авиационной и космической техники;
- 2) контроль отслоений обшивки от сотового (преимущественно металлического) наполнителя, смятие ячеистого наполнителя;
- 3) контроль расслоений и отслоений теплозащитных покрытий изделий ракетно-космической техники;
- 4) контроль расслоений, ударных повреждений, трещин, инородных включений в монолитных ПКМ;
- 5) контроль трещин в металлических лопатках турбин, в том числе под жаропрочным покрытием;
- 6) контроль внутренней коррозии металлических оболочек различного типа;

7) контроль материалов и изделий, изготовленных способами 3D печати.

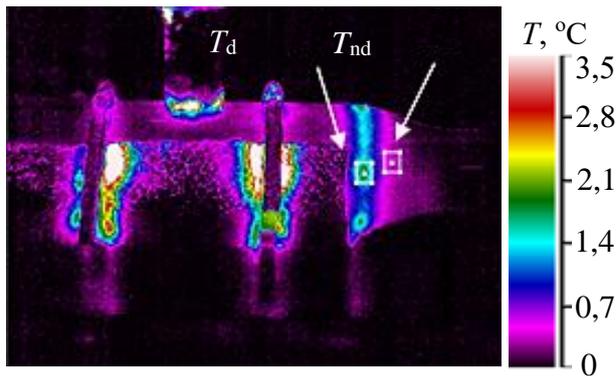
Полимерные и металлические материалы и изделия, изготовленные методами аддитивных технологий, например, путем экструзионной печати (FDM) или методом селективного лазерного спекания (SLS), являются предметом перспективных исследований с точки зрения видов НК. В ТПУ (г. Томск) были проведены предварительные исследования образцов трехмерной печати, которые показали положительные результаты контроля подобного рода структур. В частности, термоакустическим способом ТНК был проконтролирован тонкостенный цилиндр, в зоне перехода диаметров которого были зарегистрированы существенные температурные индикации (соответствующие результаты приведены на рисунке 1.3), свидетельствующие о наличии внутренних несплошностей [115-119].

Реализация перечисленных выше областей применения ТНК возможна с использованием различных устройств, которые можно разделить на три типа:

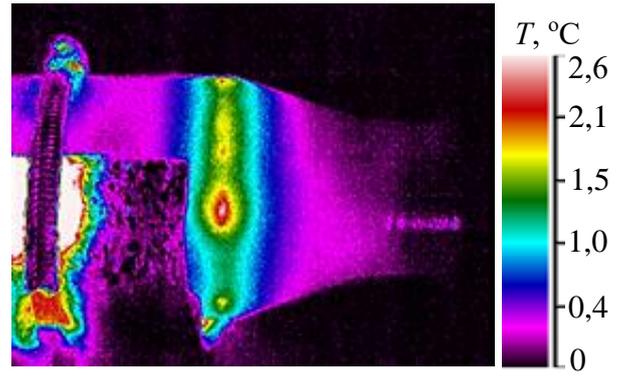
1) портативные устройства, которые в процессе ТНК находятся непосредственно в руках оператора и реализуют односторонний ТНК отдельными зонами или способом тепловизионного сканирования;

2) роботизированные системы, которые могут быть выполнены как в виде самодвижущихся аппаратов с дистанционным управлением, так и в виде комплексов на базе роботизированных манипуляторов (роботизированные системы применяют для решения задач контроля качества серийных или крупногабаритных изделий, обеспечивают высокую производительность испытаний за счет высокого уровня автоматизации процедуры ТНК и последующей обработки данных);

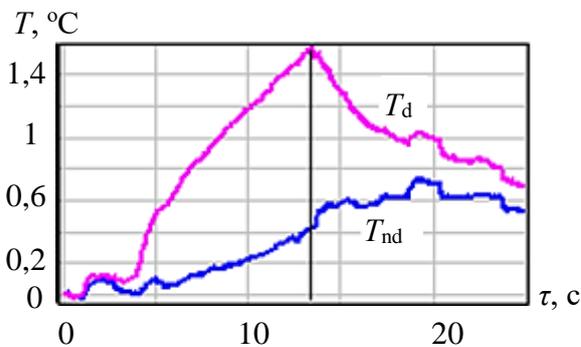
3) лабораторные установки, которые, как правило, представляют собой набор разобранного оборудования, а также портативные и стационарные системы лабораторного применения, которые могут быть достаточно универсальными и специализированными под контроль конкретного типа изделий.



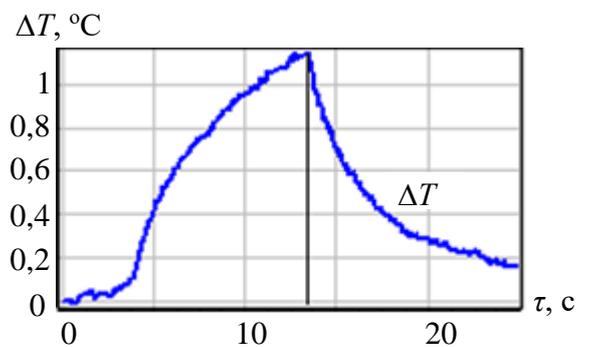
а) термограмма цилиндра в процессе УЗ стимуляции (10-я секунда ТНК)



б) термограмма дефектной области цилиндра в процессе УЗ стимуляции (10-я секунда ТНК)



в) графики температуры в зоне дефекта T_d и в бездефектной зоне T_{nd}



г) график температурного сигнала ΔT в зоне дефекта (величина отношения сигнал/шум $S = 12.1$)

Рисунок 1.3 – Результаты термоакустического контроля металлического цилиндра, изготовленного методом 3D печати (адаптировано из [118])

В таблице 1.3 приведены коммерческие тепловые дефектоскопы различного типа, которые нашли применение для контроля качества материалов и изделий авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности в различных странах мира.

Таблица 1.3 – Устройства ТНК различных типов зарубежного производства

Название/описание (страна производства)	Внешний вид / пример применения	
Портативные тепловые дефектоскопы		
C-CheckIR (Германия) [120]		
NDTherm (Израиль) [121]		
VoyageIR Pro (США) [122]		
EchoTherm (США) [122]		

Продолжение таблицы 1.3

ThermoScope II
(США) [122]



Роботизированные тепловые дефектоскопы

Роботизированный
ТНК изделий
сложной формы из
ПКМ в Safran
(Франция) [123]



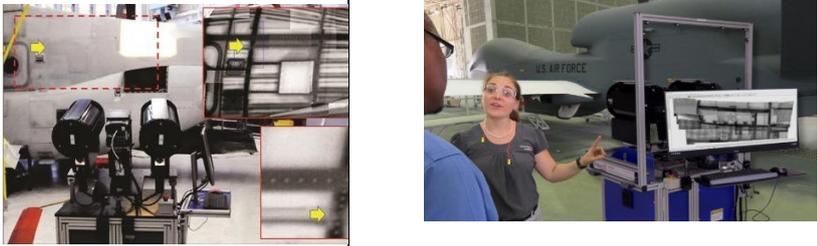
Роботизированный
ТНК фюзеляжа
самолета в NASA
(США) [124]



Лабораторные дефектоскопы / системы ТНК

Системы EDEVIS
(Германия) [125]



Продолжение таблицы 1.3	
Системы InfraTec (Германия) [126]	
Система ТНК крупногабаритных изделий (США) [122]	
Установка ТНК лопаток турбин, (США) [122]	

Многие из приведенных в таблице 1.3 тепловых дефектоскопов и систем являются продуктом американской компании Thermal Wave Imaging. Эти устройства в портативном и лабораторном исполнении применяют для контроля качества ответственных конструкций, корпусов и обшивок из ПКМ высокотехнологичной техники. Высокий уровень разработки приведенных устройств обусловлен тем, что ТНК является обязательным видом НК для проведения дефектоскопии и дефектометрии материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники в США и странах Европы. Отсутствие на российском рынке тепловых дефектоскопов зарубежного производства (исключение -

устройство NDTherm (Израиль) [121]) до введения запрета на поставки высокотехнологичного оборудования в Россию связано с высокой стоимостью такой аппаратуры и низкими темпами внедрения новых видов НК отечественными промышленными предприятиями.

Существенная часть настоящей диссертационной работы посвящена разработке тепловых дефектоскопов, их внедрению на промышленных предприятиях с целью повышения качества продукции отечественной авиационной и ракетно-космической техники, а также формированию технологического суверенитета России. Разработкам устройств ТНК посвящена Глава 6 настоящей диссертации.

1.5 Выводы по Главе 1

Настоящая Глава посвящена изложению основных этапов развития ТНК. Содержит описание преимуществ и недостатков различных процедур ТНК в сравнении с другими видами неразрушающих испытаний, а также описание областей применения ТНК. В Главе перечислены ведущие зарубежные и отечественные научные группы, выполняющие исследования по различным аспектам применения ТНК. Кроме того, приведен список основных алгоритмов обработки данных, используемых в ТНК, а также описаны портативные, стационарные и роботизированные установки ТНК зарубежного производства, применяемые на практике для контроля качества изделий из ПКМ.

Описаны основные мировые достижения в области активного ТНК и направления его развития, которые послужили фоном настоящей научно-исследовательской работы по усовершенствованию имеющихся и разработке новых подходов к ТНК, в особенности, пригодных для практического применения.

ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Как было описано в Главе 1, первые исследования в области активного ТНК, как полноценного вида НК, были инициированы достижениями в области ИК техники и разработками теплофизических основ данного метода в 1970-х гг. За рубежом теория ТНК была первоначально связана с аналитическими решениями одномерных задач теории теплопроводности. В России, в частности, в работах научной группы В.П. Вавилова (ТПУ, г. Томск) были сформулированы основы численного анализа двух- и трехмерных задач ТНК, которые адекватно коррелируют с результатами экспериментальных исследований. Фактически, теория ТНК, в значительной степени сформированная в ТПУ (г. Томск), нашла практическую реализацию в виде оригинального программного обеспечения ThermoCalc 3D [127] для численного моделирования процедур ТНК и была использована в настоящей работе.

2.1 Теплофизическая постановка задачи ТНК

В большинстве случаев, при моделировании процедур ТНК приемлемым является представление объекта контроля в виде многослойного параллелепипеда, внутренние дефекты которого также представляют в виде отдельных параллелепипедов или группы параллелепипедов, образующих форму, приближенную к форме моделируемого дефекта (рисунок 2.1). Пример математической постановки классической задачи ТНК однослойной пластины, содержащей три внутренних дефекта, одна поверхность которой нагревается однократным импульсом, может быть описан уравнениями (2.1 - 2.6) [1].

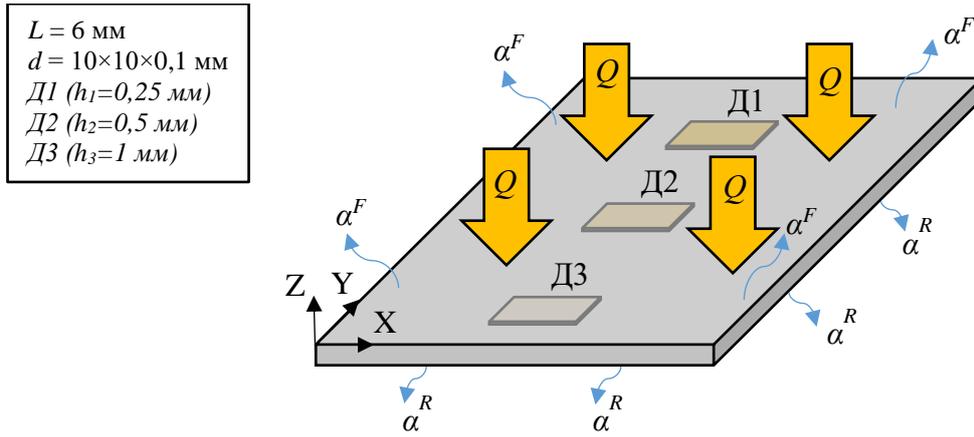


Рисунок 2.1 – Трехмерное представление пластины с тремя внутренними дефектами, расположенными на различной глубине

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a_i^x \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + a_i^y \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + a_i^z \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial z^2}; \quad (2.1)$$

$i = 1 + 3$ (один слой + 3 дефекта);

$$T_i(\tau = 0) = T_{in}; \quad (2.2)$$

$$-\lambda_1^z \frac{\partial T_1(x, y, z = 0, \tau)}{\partial z} = Q(x, y, z, \tau) - \alpha^F [T_1(x, y, z, \tau) - T_a] \quad (2.3)$$

$$\lambda_1^z \frac{\partial T_1(x, y, z = L_z, \tau)}{\partial z} = -\alpha^R [T_1(x, y, z, \tau) - T_a] \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0 \quad \text{для } x = 0, y = 0 \dots L_y; \quad x = L_x, y = 0 \dots L_y; \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial y} = 0 \quad \text{для } y = 0, x = 0 \dots L_x; \quad y = L_y, x = 0 \dots L_x;$$

$$\lambda_i^{q_j} \cdot \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} = \lambda_{i \pm 1}^{q_j} \cdot \frac{\partial T_{i \pm 1}(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} \quad T_i(x, y, z, \tau) = T_{i+1}(x, y, z, \tau) \quad (2.6)$$

где: T_i – текущая температура в i -й области, отсчитываемая от начальной температуры объекта контроля T_{in} ; i – количество слоев объекта контроля и количество внутренних дефектов; a_i^{qj} , λ_i^{qj} коэффициенты температуропроводности и теплопроводности в i -й области на границе дефекта вдоль координаты q_j ; x, y, z – декартовы координаты; q_j – одна из трех декартовых координат x, y или z для дефектных областей; τ – время; $Q(x, y, \tau)$ – мощность теплового потока, зависящая от времени и пространственных координат; α^F, α^R – коэффициенты

теплоотдачи на передней и задней поверхностях объекта контроля; T_a – температура окружающей среды; L_x, L_y, L_z – размеры изделия по трем декартовым координатам.

Уравнение (2.1) представляет собой трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа; уравнение (2.2) описывает начальное условие; уравнением (2.3) заданы граничные условия (ГУ) на передней поверхности пластины, включая ее нагрев и охлаждение; уравнение (2.4) описывает ГУ на задней поверхности пластины и описывает только процесс охлаждения; уравнения (2.5) соответствуют адиабатическим ГУ на боковых поверхностях объекта (вдоль координат x и y); уравнения (2.6) описывают условия неразрывности температуры и тепловых потоков на границах дефектов.

Следует отметить, что оператором с помощью функции $Q(x, y, z, \tau)$ могут быть заданы различные характеристики нагрева или охлаждения, что позволяет моделировать одно- и двухстороннюю процедуры ТНК с равномерным и неравномерным пространственным распределением потока нагрева или охлаждения, а также стимуляцию линейным движущимся источником. В рамках настоящей диссертационной работы реализованы ГУ, соответствующие новым процедурам ТНК, в частности, реализован способ последовательного применения импульсов нагрева и принудительного охлаждения, которому посвящена Глава 5.

2.2 Параметры, влияющие на результативность ТНК

В процедурах ТНК температурные индикации над внутренними дефектами, например, расслоениями, заполненными воздухом, характеризуются амплитудами температурных сигналов ΔT (2.7) и контрастов C (2.8), а также временем их появления τ_m [1].

$$\Delta T = T_d - T_{nd}; \quad (2.7)$$

$$C = \Delta T / T_{nd}, \quad (2.8)$$

где T_d и T_{nd} – температура дефектной и бездефектной областей.

Величины ΔT и C , а, следовательно, и результативность ТНК, в большей или меньшей степени зависят от следующих параметров:

- длительности τ_h [с] и мощности Q [Вт/м²] импульса нагрева;
- длительности процедуры контроля τ [с];
- коэффициента излучения поверхности объекта контроля ϵ ;
- уровня температурных шумов (аддитивной и мультипликативной составляющих);
- толщины объекта контроля L [м] и теплофизических характеристик его материала λ [Вт / м×К], ρ [кг/м³], C [Дж / (кг×К)];
- геометрических размеров d_x, d_y, d_z [мм], глубин залегания h [мм] и ТФХ материала дефекта λ [Вт / м×К], ρ [кг / м³], C [Дж / (кг×К)];
- интенсивности теплообмена объекта контроля с окружающей средой α^F , α^R [Вт / м²×К].

Ниже на примере результатов численного моделирования одно- и двухсторонней процедур ТНК объектов контроля в виде пластин из углепластика и многослойной структуры металл-теплозащита описаны основные аспекты теории ТНК.

2.3 Длительность и мощность импульса нагрева. Длительность процедуры контроля

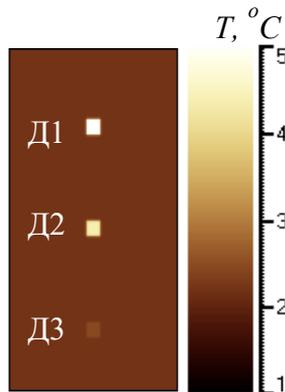
На рисунках 2.2 *а, б* показаны термограммы модели (см. рисунок 2.1) для передней и задней поверхностей, соответствующие 2-й и 20-й секундам ТНК, на которых видно дефекты, представляющие собой расслоения, заполненные воздухом. Ввиду того, что на амплитуду температурного сигнала ΔT наибольшее влияние оказывает компонент тензора теплопроводности λ_z , направленный вглубь изделия, в исследованной модели не была учтена анизотропия, которой характеризуется, например, углепластик ввиду различной теплопроводности композита вдоль продольных и поперечных координат, что, в основном, затрудняет определение поперечных размеров внутренних дефектов. Кроме того, модель не

содержала температурных шумов, которыми характеризуются любые экспериментальные данные. Параметры модели ТНК:

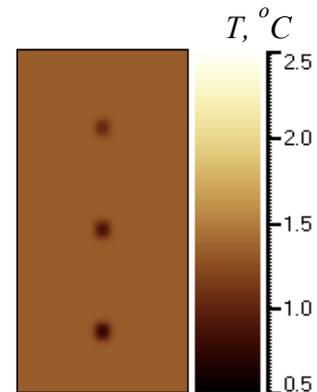
- характеристики объекта контроля: $\lambda_t = 0,62$ [Вт / м×К], $\rho_t = 1030$ [кг/м³], $C_t = 1450$ [Дж / (кг×К)], $L = 6$ [мм];

- характеристики дефектов: $\lambda_d = 0,02$ [Вт / м×К], $\rho_d = 1030$ [кг/м³], $C_d = 1450$ [Дж / (кг×К)], $d_x = 10$ мм, $d_y = 10$ мм, $d_z = 0,1$ [мм], $h = 0,25; 0,5; 1$ [мм];

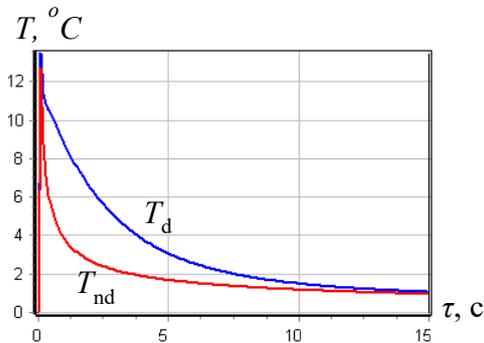
- длительность импульса нагрева: $\tau_h = 0,015$ [с].



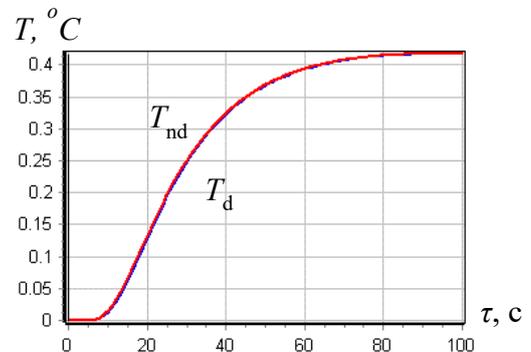
а) термограмма передней поверхности объекта контроля (2-я секунда ТНК)



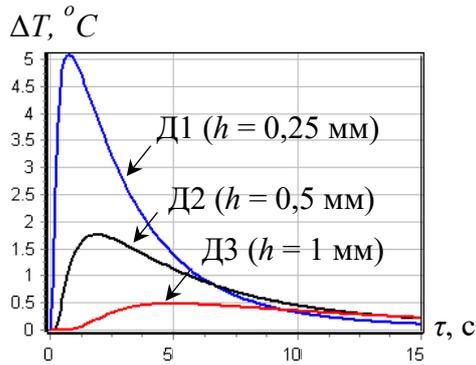
б) термограмма задней поверхности объекта контроля (20-я секунда ТНК)



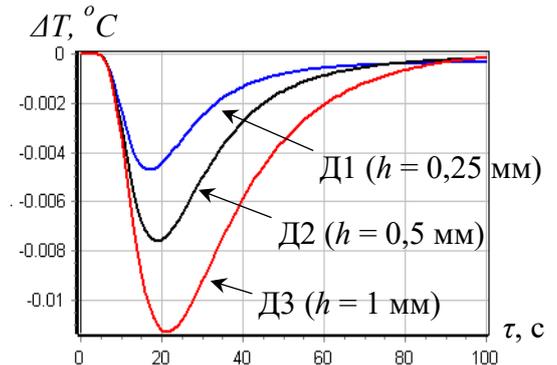
в) графики температуры дефектной (Д1) и бездефектной областей для передней поверхности



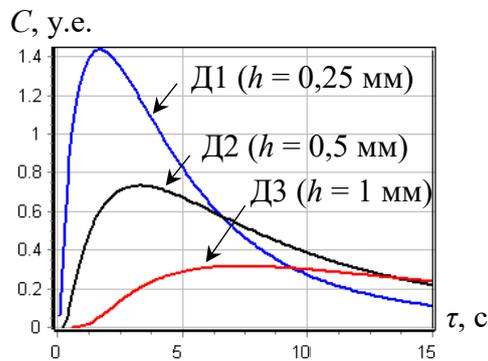
г) графики температуры дефектной (Д1) и бездефектной областей для задней поверхности



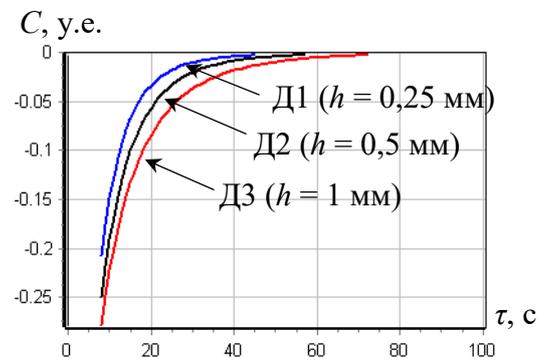
д) графики температурных сигналов дефектных областей Д1-Д3 для передней поверхности



е) графики температурных сигналов дефектных областей Д1-Д3 для задней поверхности



ж) графики температурных контрастов дефектных областей Д1-Д3 для передней поверхности



з) графики температурных контрастов дефектных областей Д1-Д3 для задней поверхности

Рисунок 2.2 – Результаты численного моделирования одно- и двухстороннего ТНК, демонстрирующие изменения температурных сигналов ΔT и контрастов C во времени для различных дефектных ситуаций

Ввиду того, что материал дефектов имеет теплопроводность ниже, чем теплопроводность основного материала объекта контроля, температура в зонах дефектов на передней поверхности (при одностороннем контроле) выше температуры бездефектной зоны, и ниже на задней поверхности объекта контроля при двухсторонней процедуре ТНК. Из приведенных графиков видно, что различие между температурами дефектной T_d и бездефектной T_{nd} областей начинает

проявляться после окончания импульса нагрева, т.е. на стадии остывания. Этот факт объясняется тем, что длительность кратковременного импульса нагрева τ_h меньше, чем длительность характерных времен теплопередачи, определяемых безразмерным критерием Фурье [1], см. (2.9):

$$Fo = a \times \tau / L^2, \quad (2.9)$$

где a – температуропроводность материала объекта контроля, τ – характерное время теплопередачи, L – толщина контролируемого материала.

Экстремумы температурных сигналов ΔT и контрастов S определяют время оптимального обнаружения дефектов на передней и задней поверхностях объекта контроля. Сравнивая рисунки 2.2 д, ж, видно, что максимальное значение ΔT опережает по времени максимальное значение контраста S . Графики рисунка 2.2 з показывают, что экстремумы температурного контраста S на задней поверхности объекта контроля соответствуют начальному периоду процедуры ТНК, т.е. времени, когда избыточная температура бездефектной области T_{nd} и, соответственно, уровень температурного сигнала ΔT малы (на рисунке 2.2 з графически изменения S показаны для периода времени, в который избыточная температура задней поверхности отлична от нуля). В связи с этим, в двухсторонней процедуре ТНК оптимальным временем обнаружения дефектов является время, при котором температурный сигнал ΔT начинает превышать уровень температурных шумов. Кроме того, во многих случаях, время максимального отношения сигнал/шум S – одного из основных анализируемых параметров ТНК, соответствует времени максимального контраста S , и может рассматриваться как оптимальное время обнаружения дефектов.

Увеличение длительности импульса нагрева τ_h приводит к тому, что время максимума τ_m температурного сигнала ΔT от близко расположенного к нагреваемой поверхности дефекта начинает увеличиваться в соответствии с длительностью импульса нагрева. На рисунке 2.3 приведены результаты ТНК той же модели (рисунок 2.1), но при длительности импульса 3, 5 и 10 с. Кажущееся время оптимального обнаружения дефектов с большей глубиной залегания также

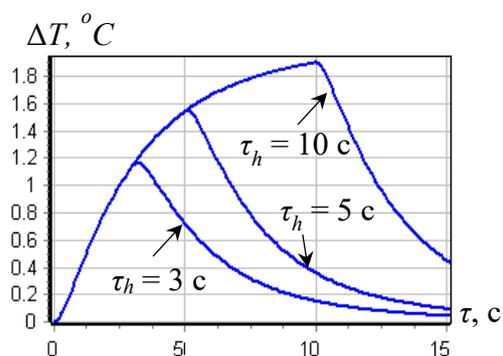
увеличивается с увеличением длительности импульса нагрева τ_h . Момент окончания нагрева на графиках температурных контрастов C сопровождается явно выраженным выбросом, в случае, если истинное оптимальное время обнаружения дефектов τ_m находится «внутри» импульса нагрева (см. рисунок 2.3 б, з, е). Такой факт обусловлен тем, что задний фронт импульса нагрева действует как импульс Дирака, поэтому кратковременный скачок контраста отмечается всегда после прекращения действия прямоугольного импульса.

Таким образом, оптимальным для ТНК является короткий и мощный импульс нагрева, который не приводит к перегреву контролируемой поверхности и характеризуется равномерным по интенсивности потоком энергии.

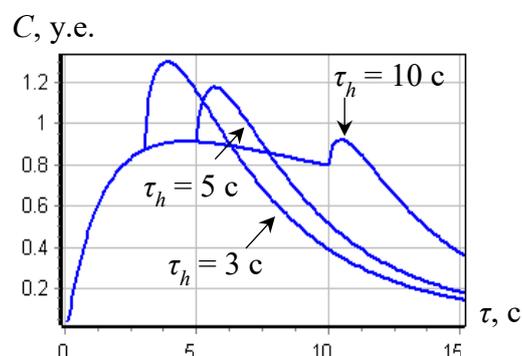
Следует отметить, что одним из способов решения проблемы неравномерности нагрева, характерной для классических одно- и двухсторонней процедур ТНК, является использование движущегося линейного источника. Кроме того, использование линейных нагревателей при реализации ТНК способом тепловизионного сканирования (разработке данного способа посвящена Глава 3) обеспечивает высокую интенсивность нагрева. Соответствующее ГУ (2.10) при ТНК с использованием движущегося источника нагрева имеет вид:

$$\lambda_1^z \frac{\partial T_1(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = Q(x, y, \tau, V, z=0) - \alpha^F [T_1(x, y, z=0, \tau) - T_a], \quad (2.10)$$

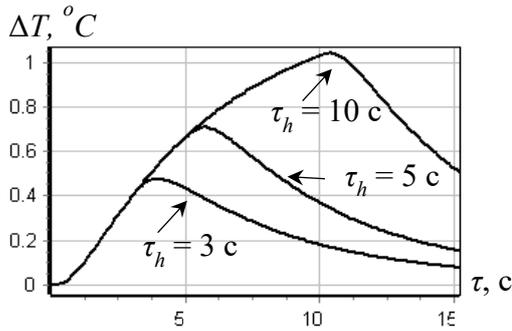
где V – скорость перемещения линейного теплового потока, распределение которого определяется функцией координат x, y .



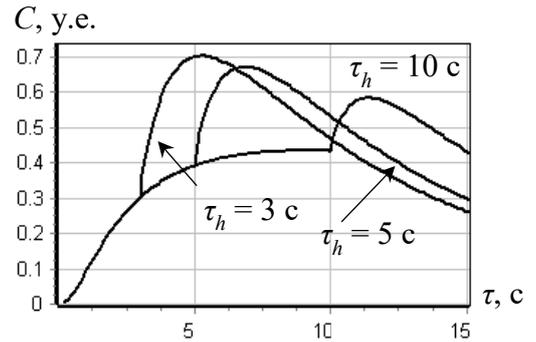
а) графики температурных сигналов
над дефектом Д1



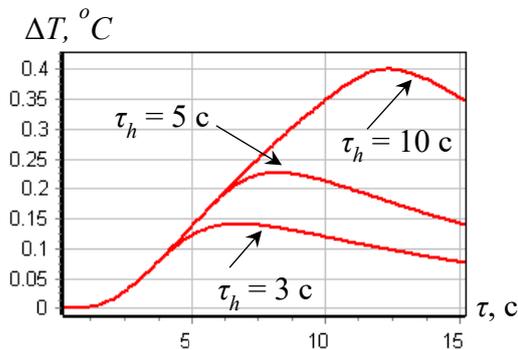
б) графики температурных контрастов
над дефектом Д1



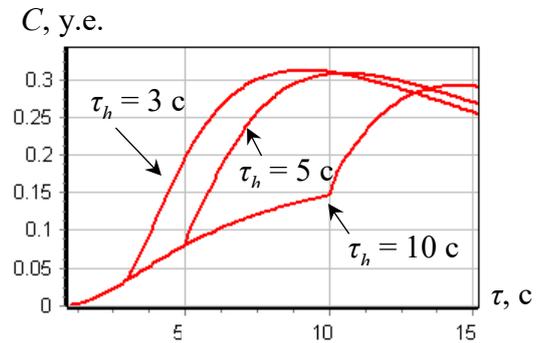
б) графики температурных сигналов
над дефектом Д2



г) графики температурных контрастов
над дефектом Д2



д) графики температурных сигналов
над дефектом Д3



е) графики температурных контрастов
над дефектом Д3

Рисунок 2.3 – Результаты моделирования процедуры ТНК пластины из углепластика толщиной 6 мм при нагреве импульсами длительностью 3, 5 и 10 секунд

При ТНК может возникнуть ситуация, когда температурный сигнал ΔT от близко расположенного к поверхности дефекта изменяет свой знак, тем самым происходит инверсия ΔT . Такой эффект возникает, когда тонкие слои материала над низкотеплопроводным дефектом, остывают быстрее, чем более массивные слои бездефектного материала, и проявляется при большой длительности процедуры контроля. На рисунке 2.4 показан пример инверсии температурного сигнала от дефекта, расположенного на глубине 0,25 мм, наблюдаемого на передней поверхности объекта контроля.

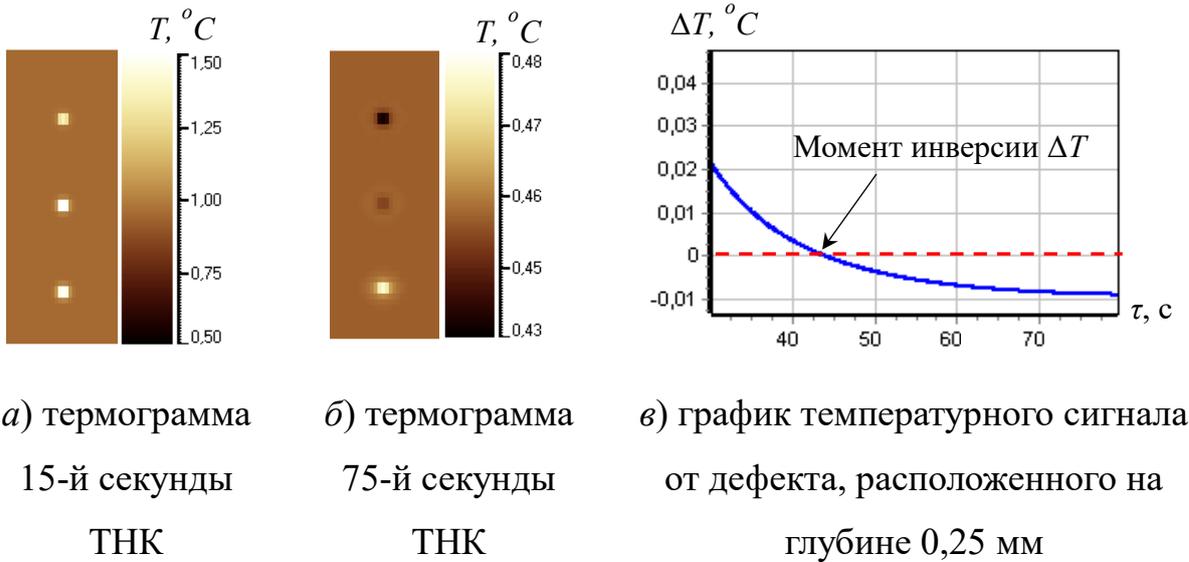


Рисунок 2.4 – Результаты моделирования ТНК с возникновением инверсии температурного сигнала

2.4 Поперечные размеры дефектов

Импульс нагрева при ТНК приводит к возникновению тепловых потоков в объекте контроля, которые под действием диффузии тепла распространяются как в глубь материала, так и в поперечных направлениях. Поперечные потоки тепла имеют наибольшую интенсивность на краях дефектов, в результате чего величина ΔT снижается для дефектов с малыми поперечными размерами, а дефекты, имеющие достаточно большие поперечные размеры, характеризуются одномерным характером теплопередачи.

На рисунке 2.5 приведены графики температурных сигналов ΔT над дефектами с поперечными размерами 5×5 , 15×15 и 20×20 мм и глубиной залегания 0,5 мм, полученные при моделировании одно- и двухсторонней процедур ТНК. По графикам видно, что относительно большие размеры дефектов при одностороннем ТНК характеризуются близкими по амплитуде и времени появления максимумами температурных сигналов ΔT . При двухстороннем ТНК такие же дефекты характеризуются различными температурными сигналами ввиду влияния глубины

их залегания относительно контролируемой поверхности. При практической реализации ТНК используется правило, согласно которому уверенное обнаружение дефектов определяется отношением его поперечного размера d_x к глубине залегания h , которое должно быть не менее 5. Таким образом, экспериментально возможно обнаружить дефект размерами 5×5 мм при его залегании на глубине 1 мм. Следует отметить, данное соотношение определено для ПКМ, а для материалов с большей теплопроводностью, например, металлов, обнаружение дефектов возможно при $d_x/h > 10$.

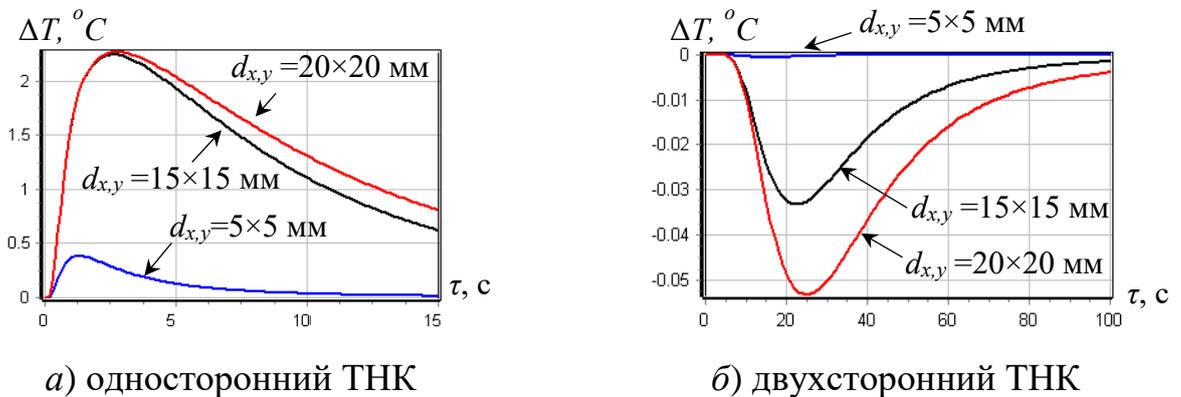


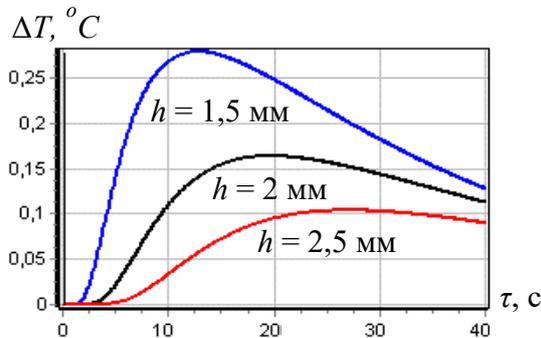
Рисунок 2.5 – Графики изменения температурных сигналов ΔT в зависимости от поперечных размеров дефектов

2.5 Глубина залегания дефектов

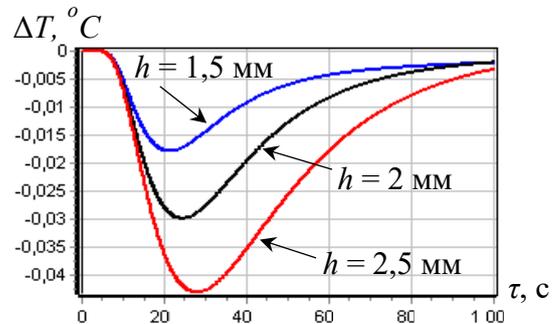
Пример влияния глубины залегания дефектов на температурные сигналы ΔT и контрасты C уже был показан на рисунке 2.2. В частности, по приведенным графикам видно, что с увеличением глубины залегания дефектов с 0,25 мм до 1 мм при одностороннем ТНК величины ΔT и C снизились примерно в 10 и в 5 раз соответственно. Дальнейшее увеличение глубины залегания дефектов, а именно, с 1,5 до 2,5 мм не приводит к столь резкому спаду величин ΔT и C , например, величина ΔT изменилась примерно в 3 раза в случае одностороннего ТНК. Оптимальное время обнаружения дефекта на глубине 2,5 мм при одностороннем контроле составляет 27 секунд.

При двухстороннем ТНК величина температурного сигнала ΔT и время появления его максимума τ_m увеличиваются с ростом глубины залегания дефектов. В частности, увеличение глубины залегания дефектов с 0,25 мм до 1 мм и с 1,5 до 2,5 мм относительно нагреваемой поверхности приводит к изменению величин ΔT примерно в 3 раза (см. рисунок 2.2 *е* и 2.6 *б*). Таким образом, в двухстороннем ТНК, максимальные значения ΔT при максимальном времени наблюдения τ_m создают дефекты, расположенные в середине толщины контролируемого образца. Дефекты с малыми поперечными размерами в двухсторонней процедуре ТНК наилучшим образом обнаруживаются если они расположены вблизи поверхности, температуру которой регистрируют.

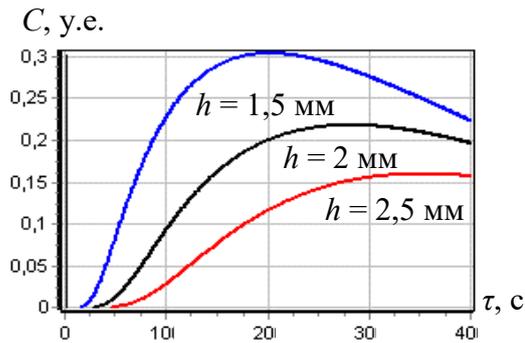
На практике, возможность обнаружения глубоко расположенных дефектов определяется уровнем температурных шумов контролируемой поверхности и чувствительностью используемого тепловизора. Например, дефект на глубине 2,5 мм характеризуется температурным сигналом ΔT на уровне 0,1 °С (см. рисунок 2.6*а*,) что сопоставимо с уровнем температурных шумов в эксперименте.



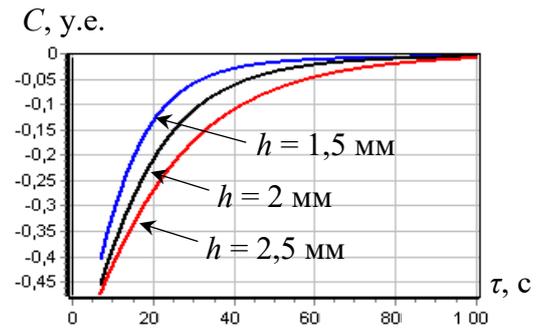
а) графики ΔT при односторонней процедуре ТНК



б) графики ΔT при двухсторонней процедуре ТНК



в) графики C при односторонней
процедуре ТНК



г) графики C при двухсторонней
процедуре ТНК

Рисунок 2.6 – Графики изменения температурных сигналов ΔT и контрастов C для дефектов с поперечными размерами 10×10 мм, расположенными на глубинах 1,5; 2 и 2,5 мм

Как было отмечено выше, повышение температурных сигналов можно достичь путем увеличения мощности нагрева (ΔT увеличивается пропорционально увеличению Q). Например, при нагреве импульсом мощностью $Q = 10^6$ Вт·м⁻² и длительностью $\tau_h = 15$ мс, избыточная температура поверхности объекта контроля не превышает 40 °С и находится в пределах допусков большинства контролируемых материалов, что не ограничивает возможность увеличения мощности импульса нагрева. Однако в условиях наличия температурных шумов, увеличение мощности импульса нагрева сопровождается пропорциональным возрастанием амплитуды мультипликативной составляющей температурного шума и не приводит к увеличению отношения сигнал/шум S .

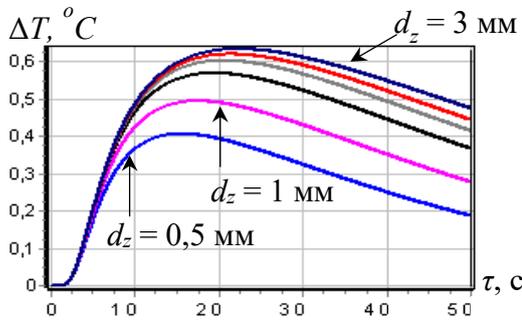
С целью предварительного определения оптимального времени появления дефекта τ_m и соответствующего подбора параметров процедуры ТНК используют уравнение (2.11), связывающее глубину залегания дефектов h и теплопроводность a материала объекта контроля [1].

$$\tau_m = h^2/a \quad (2.11)$$

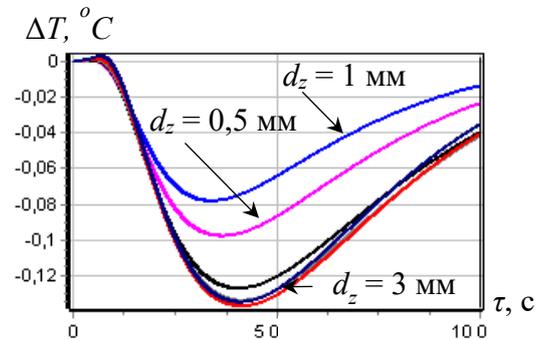
Следует отметить, что данное соотношение не учитывает поперечные размеры дефектов и дает приемлемые результаты для дефектов с относительно большими размерами.

2.6 Толщина дефектов

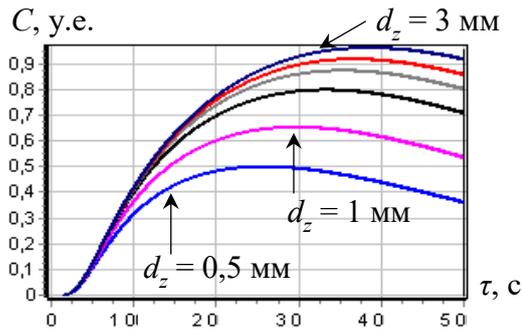
Толщина d_z влияет на выявляемость дефектов в меньшей степени, чем поперечные размеры d_x и d_y , которые проецируются на контролируемую поверхность в виде температурных «отпечатков». Графики рисунка 2.7 показывают увеличение амплитуды температурного сигнала ΔT и контраста C , а также времени появления их экстремумов τ_m , при увеличении толщины дефекта. В частности, были рассмотрены модели одно- и двухстороннего ТНК пластины из углепластика толщиной 6 мм, содержащей дефект с поперечными размерами 10×10 мм и глубиной залегания 1,5 мм, толщина которого составляла 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 мм.



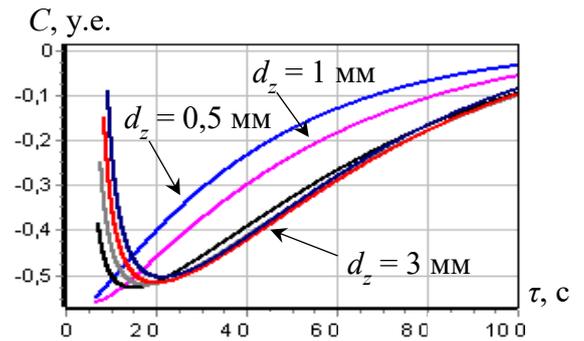
а) графики ΔT при односторонней процедуре ТНК



б) графики ΔT при двухсторонней процедуре ТНК



в) графики изменения C при односторонней процедуре ТНК



г) графики изменения C при двухсторонней процедуре ТНК

Рисунок 2.7 – Графики изменения температурных сигналов ΔT и контрастов C в зависимости от толщины дефектов

Наибольшее изменение параметров ΔT и C , а также времени τ_m , наблюдается при малых величинах d_z , в то время как для больших толщин наблюдается эффект насыщения. Следует отметить, что при разработке алгоритмов дефектометрии решающим параметром определения толщины дефекта является его тепловое сопротивление R_d [1].

$$R_d = d_z / \lambda_d \quad (2.12)$$

Из уравнения (2.12) видно, что толщина дефекта d_z и его теплопроводность λ_d совместно влияют на параметры обнаружения дефекта в отличие от поперечных размеров d_x и d_y .

2.7 Аддитивная и мультипликативная составляющие температурных шумов

Как было отмечено выше, одним из способов увеличения температурных сигналов ΔT дефектов является увеличение мощности нагрева Q (ΔT , в отличие от C , прямо пропорционально зависит от Q). На практике, мощный и длительный нагрев обеспечивает лучшее визуальное распознавание дефектов за счет большего отношения сигнал/шум S (2.13) [1].

$$S = \Delta T / \sigma_{\text{noise}}, \quad (2.13)$$

где σ_{noise} – среднеквадратичное отклонение температуры в бездефектной зоне, которая характеризуется температурными шумами различного рода. Речь идет об аддитивных шумах приемника ИК излучения и мультипликативных шумах, связанных с неравномерностью коэффициента излучения контролируемой поверхности ε . Мультипликативные шумы особенно часто, наблюдаются при контроле неокрашенных материалов, а их уровень может быть characterized контрастом шума C_n . Такой параметр служит характеристикой пригодности конкретного материала или объекта контроля для ТНК. Следует отметить, что контраст шума C_n является переменной величиной, изменяющейся во времени сложным образом, в частности, из-за наличия отраженного излучения окружающих предметов.

На рисунке 2.8 приведены графики изменения отношения сигнал/шум S в зонах дефектов, расположенных на глубинах 0,25; 0,5 и 1 мм при различной поглощённой энергии W , обусловленной различной длительностью нагрева: 3; 5 и 10 с. В моделях ТНК был добавлен аддитивный (с коэффициентом 0,05) и мультипликативный (с коэффициентом 0,15) шум. Из графиков рисунка 2.8 следует, что с увеличением поглощенной мощности нагрева W в 3 раза, соответственно в 2 раза увеличивается и величина отношения сигнал/шум S . Следует отметить, что время максимумов отношения сигнал/шум S коррелирует со временем максимумов температурных контрастов C (см. рисунок 2.3).

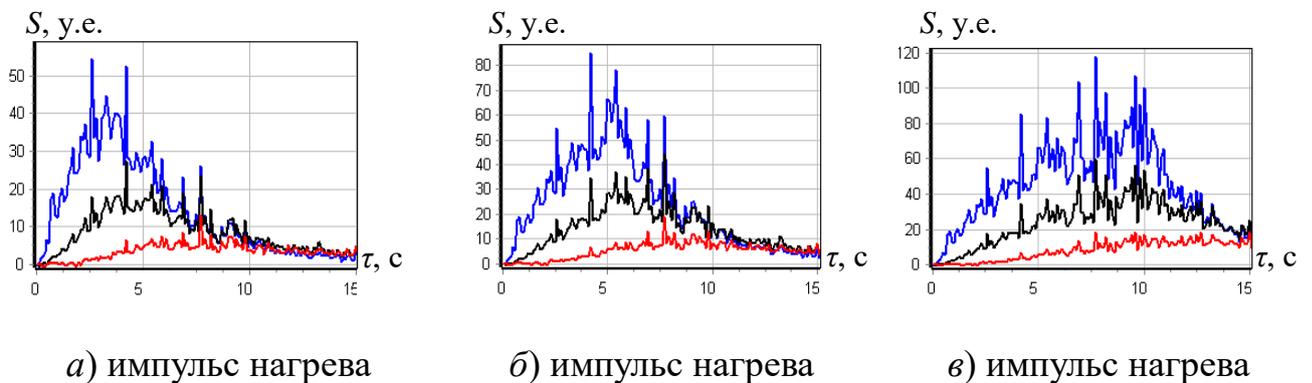


Рисунок 2.8 – Графики изменения отношения сигнал/шум S над внутренними дефектами при различной длительности тепловой стимуляции

2.8 Интенсивность теплообмена

В уравнениях (2.3) и (2.4), определяющих ГУ, использованы коэффициенты конвективного теплообмена передней и задней поверхностей $\alpha^{F,R} = \alpha_{cv}$, которые характеризуют интенсивность взаимодействия объекта контроля с окружающей средой. Процессы конвективного нагрева или охлаждения описываются законом Ньютона, причем существует ряд эмпирических формул для определения коэффициента конвективного теплообмена в зависимости от ориентации объектов контроля в пространстве. При моделировании процедуры ТНК обычно учитывают интенсивность теплообмена с передней и задней поверхностей на уровне $10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}$, пренебрегая теплообменом с торцов объекта контроля (речь идет о моделировании процедуры ТНК объекта контроля в виде пластины).

Приближая модель к условиям реального эксперимента ТНК, помимо конвективного теплообмена, следует учитывать радиационный теплообмен между объектом контроля и окружающей средой. Радиационный теплообмен представляет собой поток квантов электромагнитного излучения, который излучают все физические тела с температурой выше абсолютного нуля [1]. В интегральном выражении плотность мощности радиационного излучения Q_{rd} описывается законом Стефана-Больцмана (2.14), который для теплообмена между двумя плоскими телами с температурами T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$) имеет следующий вид:

$$Q_{rd} \approx \varepsilon_{red} \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.14)$$

где $\varepsilon_{red} = 1 / (\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1)$ – приведенный коэффициент излучения и σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$).

Описывая теплообмен с учетом конвекции и излучения между теплым объектом (T_s) и холодной окружающей (газообразной) средой (T_a), используют уравнение (2.15).

$$Q = Q_{cv} + Q_{rd} = \alpha_{cv} (T_s - T_a) + \varepsilon_{red} \sigma (T_s^4 - T_a^4). \quad (2.15)$$

Ввиду того, что при практической реализации ТНК разница температур T_s и T_a обычно мала, а объекты контроля после подготовки имеют относительно высокий

коэффициент излучения (контролируемую поверхность покрывают матовой краской черного цвета для достижения ε на уровне от 0,94 до 0,96), член уравнения (2.15), описывающий радиационный теплообмен, можно преобразовать в (2.16).

$$\varepsilon_{red}\sigma(T_s^4 - T_a^4) \approx 4\sigma\left(\frac{T_s+T_a}{2}\right)^3(T_s - T_a) = \alpha_{rd}(T_s - T_a), \quad (2.16)$$

где α_{rd} - коэффициент теплообмена, обусловленный излучением.

В результате комбинированный коэффициент теплообмена с окружающей средой α имеет следующий вид (2.17) и зависит от формы объекта контроля и его ориентации в пространстве, а также от разницы температур $T_s - T_a$.

$$\alpha = \alpha_{cv} + \alpha_{rd} \quad (2.17)$$

Таким образом, ГУ, учитывающее конвекционный и радиационный процессы теплообмена, имеет следующий вид:

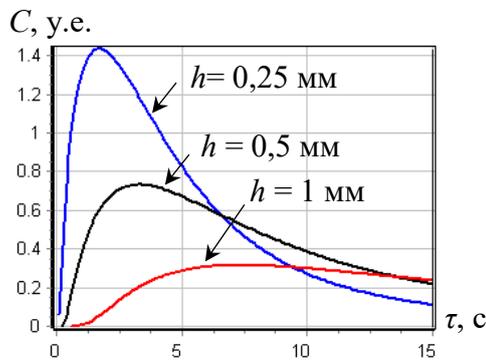
$$\lambda_1^z \frac{\partial T_1(x,y,z=0,\tau)}{\partial z} = Q(x,y,z=0,\tau) - (\alpha_{cv} + \alpha_{rd})[T_1(x,y,z=0,\tau) - T_a]. \quad (2.18)$$

Следует отметить, что ГУ (2.18) реализовано в программном обеспечении ThermoCalc 3D, с помощью которой анализируют влияние мощности комбинированного излучения на выявляемость дефектов при ТНК.

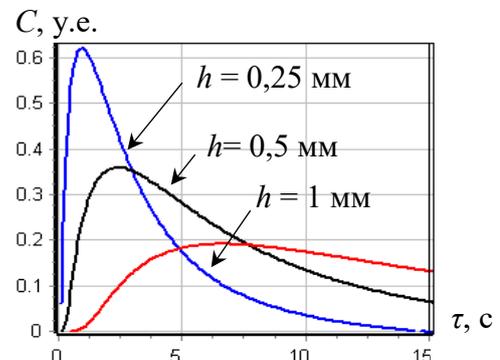
2.9 Теплофизические характеристики материала объекта контроля

Оптимальными, с точки зрения ТНК, являются материалы, поверхностный нагрев которых обеспечивает максимальный уровень температурных контрастов S . Моделирование задач ТНК показывает, что уровни температурных контрастов S для ПКМ, например, для углепластиков ($\lambda = 0,61$ Вт/(м×К); $\rho = 1411$ кг/м³, $C = 2462$ Дж/(кг×К)), выше, чем для низкотеплопроводных материалов, например, для теплозащитных покрытий ($\lambda = 0,19$ Вт/(м×К); $\rho = 470$ кг/м³, $C = 2000$ Дж/(кг×К)). Однако на практике, как было отмечено выше, углепластиковые ПКМ характеризуются высоким уровнем мультипликативных шумов, что снижает величину отношения сигнал/шум S . На рисунке 2.9 приведены графики изменения температурных контрастов S над дефектами с размерами

10×10 мм, толщиной 0,1 мм и расположенных на глубине 0,25; 0,5 и 1 мм в пластинах из углепластика и структуре металл-теплозащита (рассмотрены материалы, используемые в авиационной и космической технике). Результаты соответствуют односторонней процедуре ТНК.



а) результаты ТНК пластины из углепластика



б) результаты ТНК многослойной структуры металл-теплозащита

Рисунок 2.9 – Графики изменения температурных контрастов C над дефектами в материалах с различными ТФХ

Анизотропия теплофизических свойств является специфическим параметром углепластиковых ПКМ и особенно явно выражается при ТНК мононаправленных волокнистых композитов (теплопроводность углепластиковых ПКМ вдоль волокон практически в 10 раз превышает теплопроводность поперек волокон). Кроме того, большинство монолитных углепластиковых ПКМ изготовлены с чередованием угла укладки слоев относительно друг друга, обычно по схеме 0; 45 и 90°. В таком случае эффект поперечной анизотропии снижается с увеличением толщины изделия вследствие усреднения ТФХ по всем направлениям. На рисунке 2.10 приведены термограммы пластины из углепластика, слои которого характеризовались различной теплопроводностью волокон в зависимости от их ориентации в координатах x , y , z , а именно: $\lambda_x = 8,74$ Вт/(м×К); $\lambda_y = 0,61$ Вт/(м×К); $\lambda_z = 0,62$ Вт/(м×К). Модель содержала 36 слоев, которые, в первом случае (рисунок 2.10 а), были уложены относительно друг друга с изменением угла на 45°,

а во втором случае (рисунок 2.10 б), были мононаправлены, имитируя фрагмент цилиндра, изготовленного методом намотки.

Термограммы рисунка 2.10, соответствующие 16-й секунде ТНК, оптимальной для обнаружения данного дефекта, демонстрируют влияние анизотропии материала на форму температурного отпечатка от внутреннего дефекта. В частности, при укладке анизотропных слоев в одном направлении, температурная индикация дефекта прямоугольной формы выглядит в виде овала (рисунок 2.10 б), который с увеличением времени наблюдения продолжает «растягиваться», что существенно затрудняет оценку поперечных размеров дефекта. Следует отметить, что в первые секунды процедуры ТНК температурные индикации, вне зависимости от ориентации слоев материала, имели форму близкую к размерам внутреннего дефекта, однако практическое распознавание такого дефекта на ранних временах наблюдения затруднительно ввиду низкого уровня температурного сигнала ΔT .

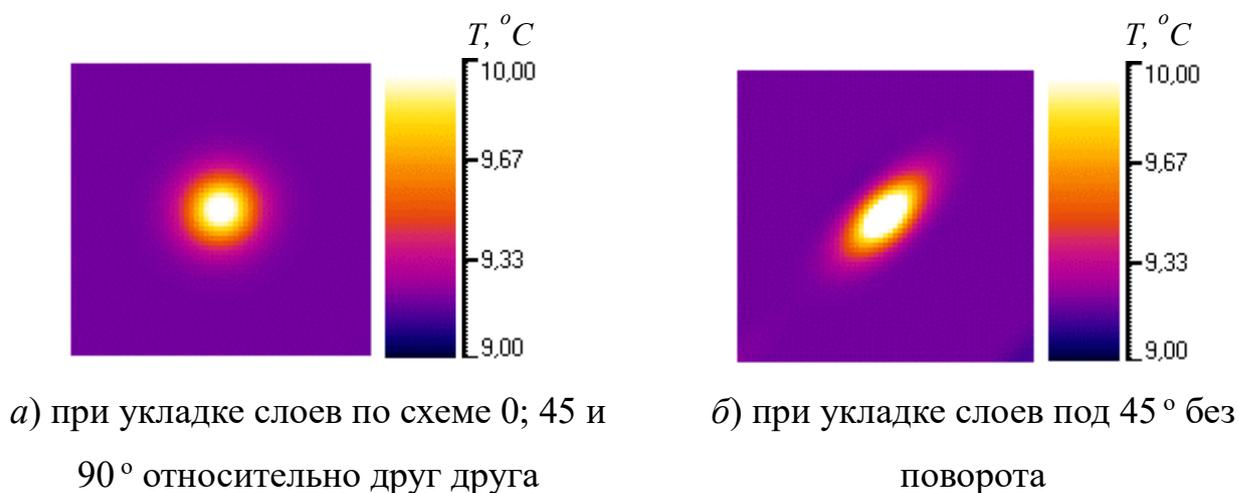


Рисунок 2.10 – Влияние анизотропии при одностороннем ТНК пластины из углепластика толщиной 6 мм с дефектом размерами $d = 10 \times 10$ мм, глубиной $h = 2,25$ мм и толщиной $d_z = 0,15$ мм. Термограммы соответствуют 16-й секунде ТНК

Частичная прозрачность контролируемых материалов в видимом диапазоне спектра излучения, в первую очередь, влияет на качество результатов ТНК при использовании оптических источников тепловой стимуляции. Установлено, что углепластики практически непрозрачны в видимом и ИК спектрах излучения, однако стеклопластиковые ПКМ характеризуются частичной прозрачностью в видимом спектре. Оптическое излучение, например, галогенной лампы, при ТНК неокрашенных стеклопластиковых ПКМ поглощается не только поверхностью, а частично проходит в глубь материала, что вызывает специфические эффекты, осложняющие процедуры дефектоскопии и дефектометрии. Граничные условия, описывающие влияние полупрозрачности контролируемого материала, сформулированы следующим образом (2.19):

$$\lambda_1^z \frac{\partial T_1(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = Q_o(x, y) e^{-\sigma z} - \alpha^F [T_1(x, y, z, \tau) - T_a], \quad (2.19)$$

где σ [1/м] – коэффициент поглощения оптического излучения материалом объекта контроля, который может быть определен экспериментально. Следует отметить, что практическим решением ТНК материалов и изделий, характеризующихся частичной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения, является применение конвекционного или контактного типа нагревателей. Применение таких типов нагревателей описано в Главе 5.

2.10 Выводы по Главе 2

В настоящей Главе обобщены теоретические аспекты нестационарной теплопроводности в многослойных твердых телах, содержащих скрытые дефекты. Приведены результаты численного моделирования параметров ТНК применительно к ПКМ. Рассмотрены типичные для классических одно- и двухсторонней процедур параметры ТНК, влияющие на эффективность обнаружения дефектов. В частности, рассмотрено влияние длительности и мощности импульса нагрева на уровни температурных сигналов и контрастов, включая времена их оптимального проявления. Описано влияние поперечных

размеров дефектов, их толщины и глубины залегания относительно контролируемой поверхности на информативные параметры ТНК. Кроме того, рассмотрено влияние температурных шумов аддитивного и мультипликативного типов на результаты ТНК, проанализирована инверсия температурных сигналов, связанная с ТФХ материалов контролируемых изделий и глубиной залегания дефектов.

ГЛАВА 3. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПЛОСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СПОСОБОМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО СКАНИРОВАНИЯ

Конструкционные элементы, корпуса и обшивки изделий современной авиационной и ракетно-космической техники, в основном, изготавливают из ПКМ, в частности, из угле- и стеклопластиков, а также их комбинаций с металлами и различного рода покрытиями [128-130]. В России для обнаружения производственных и эксплуатационных дефектов таких материалов и изделий, которые к тому же зачастую являются крупногабаритными, традиционно применяют УЗ НК и РК. В «полевых» условиях УЗ НК проводят в «ручном» режиме, а в условиях производства возможно использование сложных механизированных или роботизированных систем, в том числе реализующих РК и соответствующие виды томографии. Объективные трудности проведения НК крупногабаритных изделий в «ручном» режиме, а также ограниченное применение сложных роботизированных комплексов, делают актуальной разработку новых способов и устройств для обнаружения типичных для ПКМ дефектов.

Как было отмечено ранее, УЗ НК и РК обладают рядом недостатков при обнаружении дефектов ПКМ, которые могут быть компенсированы, применяя ТНК. Например, РК, имея высокое пространственное разрешение, характеризуется относительно низкой производительностью и требует доступа к объекту контроля с двух сторон. Кроме того, РК малоэффективен при контроле конструкционно сложных структур, например, кессона и других элементов планера самолета, из-за трудностей интерпретации результатов испытаний. Классический УЗ НК характеризуется еще более низкой производительностью испытаний, чем РК, и является неэффективным для обнаружения дефектов ПКМ, расположенных близко к контролируемой поверхности, что связано с так называемой «слепой зоной» контроля, а также требует постоянной калибровки при контроле объектов с переменной толщиной. Кроме того, УЗ НК требует обеспечения локального

иммерсионного контакта или полного погружения объекта контроля в иммерсионную среду.

Классические процедуры ТНК (рисунок 1.1 *а, б*) имеют бóльшую производительность испытаний по сравнению с РК и УЗ контролем [131]. Тем не менее, такие способы ТНК наиболее пригодны для испытаний объектов с небольшими габаритами. Дело в том, что ТНК крупногабаритных объектов (речь идет о НК обшивок летательных аппаратов на предмет наличия воды в ячейках сотовых панелей, ударных повреждений и расслоений в монолитных ПКМ) с использованием портативных дефектоскопов, сопровождается нарастающим разогревом элементов встроенных источников тепловой стимуляции, что приводит к появлению на контролируемой поверхности нестационарного отраженного теплового излучения. На практике такой эффект появляется после контроля 8-10 зон подряд, что требует либо соблюдения регулярных пауз в процедуре контроля для охлаждения нагревательного блока, либо оснащения дефектоскопа сложными системами принудительного охлаждения или экранирующими шторками [132-135]. Применение таких технических решений позволяет лишь отсрочить появление отраженной помехи от элементов нагревателей. Кроме того, ТНК крупногабаритных объектов подразумевает «сшивку» результатов в панорамную карту дефектов. Ввиду того, что объект контроля при проведении испытаний постепенно нагревается, его результирующая панорамная карта характеризуется существенной температурной неоднородностью и имеет «лоскутный» характер (см. рисунок 3.1).

В связи с вышесказанным, для ТНК крупногабаритных изделий Соискателем были разработаны способ тепловизионного сканирования (схема приведена на рисунке 1.1 *в*) в котором источник нагрева и тепловизор, расположенные на определенном расстоянии друг от друга, равномерно перемещаются относительно неподвижного объекта контроля или наоборот [106, 136-139]. Данный способ является компромиссным с точки зрения производительности и информативности результатов, а устройства, реализующие ТНК способом тепловизионного

сканирования, не требуют оснащения механическими системами подавления тепловых помех, которые были описаны выше.

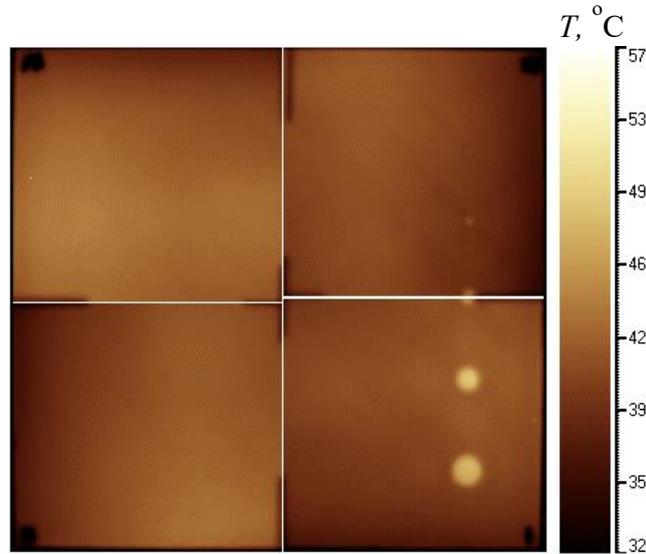


Рисунок 3.1 – Панорамное тепловое изображение крупногабаритной панели из ПКМ с внутренними дефектами в виде плоскодонных утонений, полученное путем пространственной «сшивки» 4-х отдельных последовательностей термограмм – результатов классической односторонней процедуры ТНК

Следует отметить, что в основе предложенного способа тепловизионного сканирования лежат прототипы строчно-сканирующих систем ТНК, разработанных еще в СССР.

С практической точки зрения, проведение ТНК способом тепловизионного сканирования характеризуется следующими преимуществами:

- 1) отсутствие тепловых помех в виде отражений нагревателя, т.к. тепловизор и нагреватель расположены на определенном расстоянии друг от друга;
- 2) высокая производительность испытаний, обусловленная возможностью использования линейного нагревателя большой длины;
- 3) возможность использования нагревателей оптического, конвективного, контактного и индукционного типов в зависимости от материала объекта контроля и условий проведения испытаний;

4) высокая равномерность линейного нагрева по сравнению с использованием точечных источников тепловой стимуляции [140];

5) высокий потенциал автоматизации процедуры контроля путем использования механизированной/роботизированной техники [141-144].

Основным недостатком ТНК способом тепловизионного сканирования является его меньшая информативность с точки зрения дефектометрии по сравнению с классической процедурой ТНК. Это обусловлено ограниченным временем наблюдения тепловых процессов в перемещающейся относительно средств контроля зоне. Иными словами, регистрацию температуры проводят лишь в определенном интервале времени процесса остывания контролируемой области [145-147]. По этой причине к результатам контроля, полученным способом тепловизионного сканирования, некорректно применять ряд используемых в ТНК алгоритмов обработки данных. Однако, для оценки параметров скрытых дефектов, например, для определения глубины залегания дефектов и их толщины, результаты ТНК, полученные способом тепловизионного сканирования, могут быть обработаны с помощью алгоритмов на базе искусственных нейронных сетей (описание разработок автоматизированных алгоритмов приведено в Главе 4), либо формул инверсии, полученных на основе решения прямых задач теплопроводности [49, 105, 107, 148-151].

Разработанный Соискателем способ тепловизионного сканирования был апробирован в составе роботизированных систем ТНК для контроля качества цилиндрических крупногабаритных объектов (соответствующие подтверждение приведено в Приложении Б), изготовленных из ПКМ и металлов с теплозащитным покрытием. Одна из разработанных систем обеспечила уникальную для НК производительность сплошного контроля – 25 м^2 в час [139, 152]. Следует отметить, что возможность обнаружения внутренних дефектов в полимерные теплозащитных покрытиях, используемых, например, в космической технике, является серьезным преимуществом ТНК. В таких материалах УЗ волны подвержены существенному затуханию, а РК расслоений в пористых структурах

малоэффективен, учитывая, что контролируемый теплозащитный слой обычно нанесен на металлическую подложку.

Для контроля качества плоских крупногабаритных объектов авиационной и космической техники, например, композитных крыльев самолетов МС-21, Соискателем был разработан портативный дефектоскоп, реализующий способ тепловизионного сканирования и самостоятельно перемещающийся по контролируемой поверхности [138, 146, 153]. Преимуществом такого типа устройств является возможность их использования в «полевых» условиях и в специально оборудованных цехах. При этом производительность тепловизионных испытаний, в зависимости от требуемой глубины контроля, может достигать 15 м² в час. Управление самодвижущимся дефектоскопом может осуществляться как в автоматизированном режиме, так и непосредственно оператором (описание разработанных систем приведено в Главе 6).

В настоящей Главе приведено описание разработанного способа тепловизионного сканирования и сравнение полученных результатов с результатами классического одностороннего ТНК. Описание методики проведения ТНК крупногабаритных цилиндрических объектов приведено в Приложении В. Следует отметить, что, соблюдая соглашение о конфиденциальности с определенными заказчиками, в настоящей Главе не приведены результаты контроля реальных объектов.

3.1 Сравнение распределенного импульсного и линейного непрерывного перемещающегося видов нагрева. Численное моделирование

Первым этапом разработки способа тепловизионного сканирования являлась оценка соответствия результатов ТНК, полученных при импульсном распределенном нагреве (классическая односторонняя процедура ТНК), результатам контроля, полученным при непрерывном движущемся линейном нагреве (реализация способа тепловизионного сканирования). Для этого было проведено численное моделирование обеих процедур ТНК с помощью

оригинального программного обеспечения ThermoCalc 3D Pro [154], а обработку результатов с помощью входящего в его состав программного модуля ThermoScan [155].

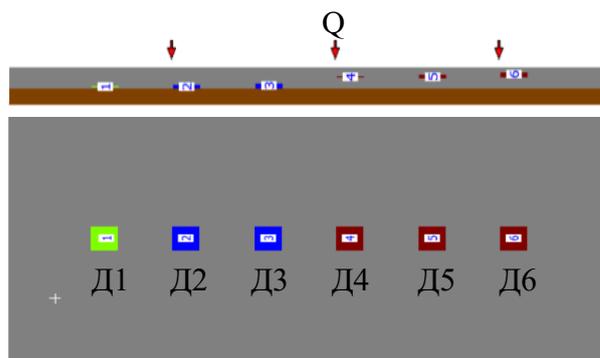
Следует отметить, что разработка способа тепловизионного сканирования была инициирована необходимостью ТНК многослойных теплозащитных покрытий, нанесенных на металлическое основание крупногабаритных объектов. В связи с этим, путем численного моделирования была исследована двухслойная пластина с поперечными размерами 200×100 мм и толщиной 10 мм, первый слой которой (толщина 6 мм) представлял собой теплозащитное покрытие, второй (нижний слой) толщиной 4 мм представлял собой металлическое основание. Теплозащитный слой содержал 6 дефектов в виде расслоений, заполненных воздухом, с шириной раскрытия от 0,5 до 1,5 мм, что имитировало глубину залегания дефектов от 1,5 до 5,5 мм относительно контролируемой поверхности. Поперечные размеры дефектов составляли 10×10 мм (см. схему расположения дефектов на рисунке 3.2 *a*). Выбор поперечных размеров внутренних дефектов обусловлен обобщенными требованиями ряда промышленных предприятий авиационной и космической отраслей промышленности, согласно которым температурная индикация классифицируется как дефект, если ее поперечные размеры равны или превышают 10×10 мм.

Теплофизические характеристики материалов, которые были использованы при создании численной модели, приведены в таблице 3.1. Шаг расчётной сетки по пространству составлял 0,1 мм; по глубине 0,01 мм; по времени 0,2 с. Длительность нагрева составляла 5 секунд как в случае импульсного распределённого нагрева, так и в случае непрерывного перемещающегося линейного нагрева, что было обеспечено шириной полосы нагрева 5 мм и скоростью перемещения линейного источника 1 мм/с.

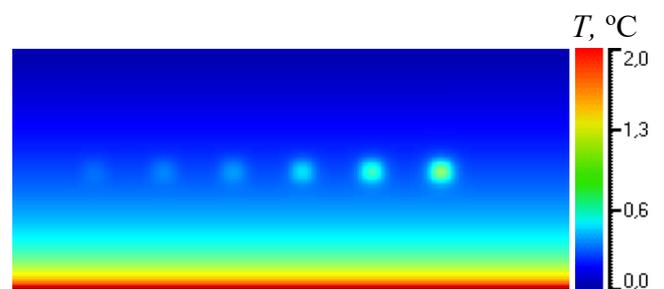
Таблица 3.1 – Теплофизические характеристики материалов, принятые в численной модели

ТФХ	Металлическая основа	Теплозащитное покрытие	Наполнение дефектов (воздух)
Коэффициент теплопроводности, Вт/м×К	177	0,286	0,02
Теплоемкость, Вт×с/кг×К	875	1524	1030
Плотность, кг/м ³	2770	1180	1,1
Толщина, мм	4	6	1,5-5,5

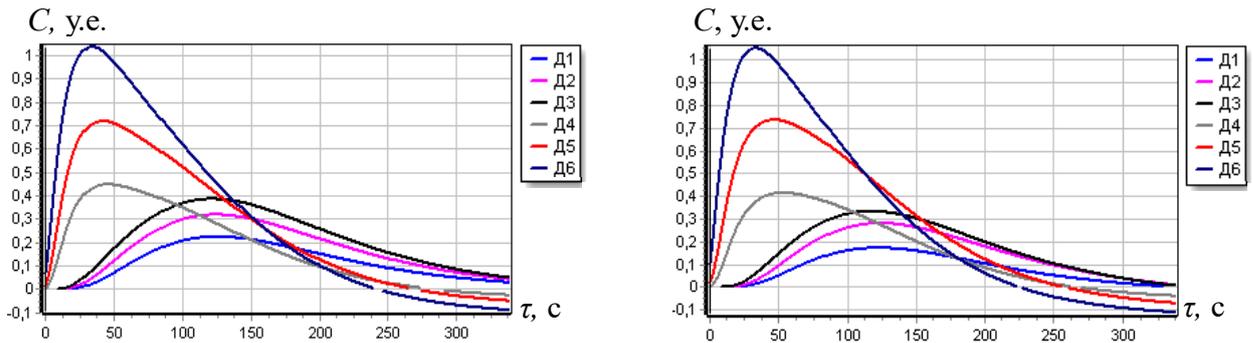
На рисунке 3.2 б приведена термограмма, соответствующая 110-й секунде контроля, при использовании движущегося линейного источника нагрева относительно стационарно установленных объекта контроля и условного приемника излучения. Графики рисунка 3.2 в, г характеризуют изменение температурного контраста S над дефектами Д1-Д6 при ТНК с использованием линейного движущегося источника нагрева и импульсного распределённого нагрева.



а) схема расположения дефектов



б) термограмма объекта контроля,
110-я секунда ТНК



в) графики температурного контраста C для дефектов Д1-Д6 при линейном движущемся нагреве

з) графики температурного контраста C для дефектов Д1-Д6 при импульсном распределённом нагреве

Рисунок 3.2 – Результаты численного моделирования ТНК металлического образца с теплозащитным покрытием при линейном движущемся и импульсном распределённом видах нагрева

В таблице 3.2 приведены максимальные для дефектов Д1-Д6 значения температурных контрастов C и время τ_m их появления.

Таблица 3.2 – Значения C и τ_m для дефектов Д1-Д6 при различных способах нагрева

Параметр контроля	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6
Распределенный импульсный нагрев						
C , у.е.	0,17	0,28	0,34	0,41	0,74	1,05
τ_m , с	122	123	116	53	46	33
Линейный непрерывный движущийся нагрев						
C , у.е.	0,22	0,31	0,39	0,45	0,72	1,03
τ_m , с	125	124	121	45	41	34

Согласно данным таблицы 3.2, оптимальные времена обнаружения τ_m дефектов Д1-Д6 при импульсном распределённом и непрерывном движущемся линейном способах нагрева имеют расхождения, не превышающие 7 %, что

является удовлетворительным и обусловлено разбросом в выборе дефектных T_d и бездефектных T_{nd} областей, усредненное значение которых использовали в расчёте C .

3.2 Лабораторные установки, реализующие ТНК способом тепловизионного сканирования

Установленное соответствие результатов численного моделирования, полученного при импульсном распределенном и линейном движущемся видах нагрева, послужило исходным пунктом разработки экспериментальных установок, реализующих ТНК крупногабаритных объектов способом тепловизионного сканирования. Однако, в отличие от процедуры ТНК, реализованной в численной модели, приведенной на рисунке 3.2, в натурном эксперименте источник нагрева и тепловизор должны синхронно перемещаться относительно контролируемой поверхности, либо наоборот. В связи с этим, и как было отмечено выше, практическое применение ТНК способом тепловизионного сканирования характеризуется рядом недостатков:

1) диапазон времени наблюдения тепловых процессов контролируемой зоны зависит от угла зрения тепловизора, расстояния от тепловизора до контролируемой поверхности, а также скорости перемещения объекта контроля относительно тепловизора;

2) регистрация температурного поля поверхности объекта контроля возможна только на стадии охлаждения (момент начала записи термограмм обычно находится в диапазоне от 5-й до 100-й секунды процедуры ТНК, его определяют в зависимости от глубины залегания контролируемых дефектов);

3) относительно низкий потенциал дефектометрии, что обусловлено двумя предыдущими пунктами;

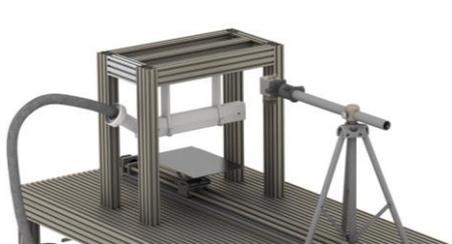
4) сложный процесс подготовки процедуры ТНК для обнаружения дефектов, расположенных на различных глубинах залегания, требующий: расчёта скорости

перемещения средств контроля; длительности фазы нагрева; мощности источника нагрева; времени задержки от начала нагрева до начала записи термограмм.

На рисунке 3.3 приведены варианты лабораторных установок ТНК способом тепловизионного сканирования, реализованных с оптическим, на базе галогенной лампы (рисунок 3.3 а); индукционным, с использованием линейной антенны (рисунок 3.3 б); конвективным, на базе промышленного фена (рисунок 3.3 в) источниками нагрева. В качестве тепловизора использованы тепловизионные модули различного уровня, обеспечивающие частоту записи термограмм, соответствующую скорости перемещения объекта контроля. В зависимости от формы и габаритных размеров, объект контроля перемещают либо линейно с равномерной скоростью на подвижной платформе, например, реализованной на базе винтовой передачи и шагового двигателя, либо обеспечивают вращение объекта контроля вдоль его продольной оси. Кроме того, перемещение объекта контроля или средств контроля может быть реализовано с помощью роботизированного манипулятора.



а) установка на базе
оптического
источника нагрева



б) установка на базе
индукционного источника
нагрева



в) установка на базе
конвективного источника
нагрева

Рисунок 3.3 – Варианты лабораторных установок, реализующих тепловизионное сканирование на базе различных типов источников нагрева

3.3 Сравнение распределенного импульсного и линейного непрерывного перемещающегося видов нагрева. Экспериментальные данные

Экспериментальную апробацию эффективности линейного непрерывного нагрева по сравнению с распределенным импульсом нагрева проводили на двух контрольных образцах №1 и №2, имитирующих многослойное теплозащитное покрытие с внутренними дефектами, нанесенное на металлическое основание (схема расположения дефектов показана на рисунке 3.4). Теплозащитное покрытие имитировали тремя слоями полиметилметакрилата толщиной 2 мм каждый, в качестве металлической подложки использовали пластину из дюрала марки Д16Т. Следует отметить, что температуропроводность полиметилметакрилата ($a_o = 1,63 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$) близка к температуропроводности теплозащитных покрытий ($a_m = 2,02 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$), используемых в высокотехнологичных отраслях промышленности [4]. Каждый образец содержал 9 плоскодонных дефектов с поперечными размерами от 5×5 мм до 45×45 мм и толщиной от 0,1 мм до 2 мм. Дефекты были выполнены в пластинах из полиметилметакрилата с помощью лазера, которым «выжигали» материал с точностью до $0,05 \pm 0,01$ мм. Подробно разработка контрольных образцов для ТНК описана в [8]. В результате, глубина залегания дефектов h варьировалась от 2,1 до 6,1 мм (см. таблицу 3.3). Между собой пластины были склеены двухсторонней клейкой лентой, что исключило затекание плоскодонных дефектов (обычно при изготовлении подобных контрольных образцов применяют эпоксидную смолу), а их контролируемая поверхность была окрашена матовой краской черного цвета, что обеспечило коэффициент поглощения на уровне 0,96.

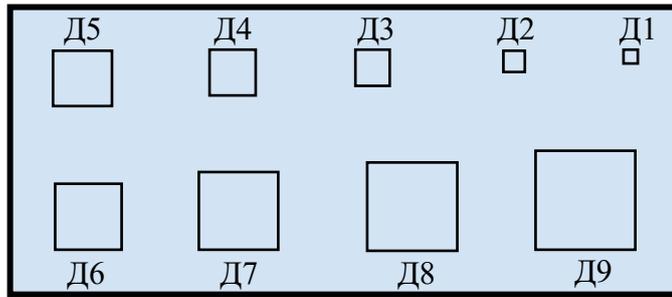


Рисунок 3.4 – Схема расположения внутренних дефектов в контрольных образцах №1 и №2

Таблица 3.3 – Параметры внутренних дефектов контрольных образцов №1 и №2

Номер дефекта	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7	Д8	Д9
Поперечный размер дефекта	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30	35×35	40×40	45×45
Толщина дефекта d , мм	2	2	1,5	1	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1
Контрольный образец №1									
Глубина залегания дефекта h , мм	4,2	4,2	4,7	5,2	5,7	5,9	5,9	6,1	6,1
Контрольный образец №2									
Глубина залегания дефекта h , мм	2,1	2,1	2,6	3,1	3,6	3,8	3,8	4,0	4,0

Перед ТНК контрольных образцов №1 и №2 с применением линейного непрерывного нагрева с помощью программного обеспечения ThermoCalc 3D Pro было проведено численное моделирование, цель которого заключалась в определении диапазона оптимального времени τ_m обнаружения скрытых дефектов Д1-Д9. Моделирование показало (см. таблицу 3.4), что оптимальное время обнаружения дефектов образца №1 находится в диапазоне от 99 до 207 секунд, а образца №2 – в диапазоне от 36 до 146 секунд, при этом уровень температурных контрастов C находится выше порога обнаружения дефектов, определяемого уровнем контраста шума C_n , который для подготовленных поверхностей составляет 3 – 4 %. Зная оптимальное время регистрации температуры и выбрав скорость перемещения объекта контроля относительно тепловизора (5 мм/с), было определено требуемое расстояние от переднего края источника нагрева до переднего края поля зрения тепловизора, определяющее длительность времени задержки, а также была определена требуемая длительность наблюдения и регистрации тепловых процессов.

Таблица 3.4 – Результаты численного моделирования контрольных образцов №1 и №2

Параметр контроля	Поперечные размеры дефектов, мм								
	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7	Д8	Д9
	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30	35×35	40×40	45×45
Контрольный образец №1									
$C, \%$	14,9	44,3	60,4	60,3	48,8	37,2	39,1	17,5	17,8
τ_m, c	99	126	146	162	178	172	207	149	146
Контрольный образец №2									
$C, \%$	33,5	88,4	103	98	70,2	50,5	52	21,6	21,9
τ_m, c	36	59	98	122	142	146	139	121	146

Верификацию результатов численного моделирования проводили в односторонней процедуре ТНК при распределенном импульсном нагреве (экспериментальная установка приведена на рисунке 3.5).

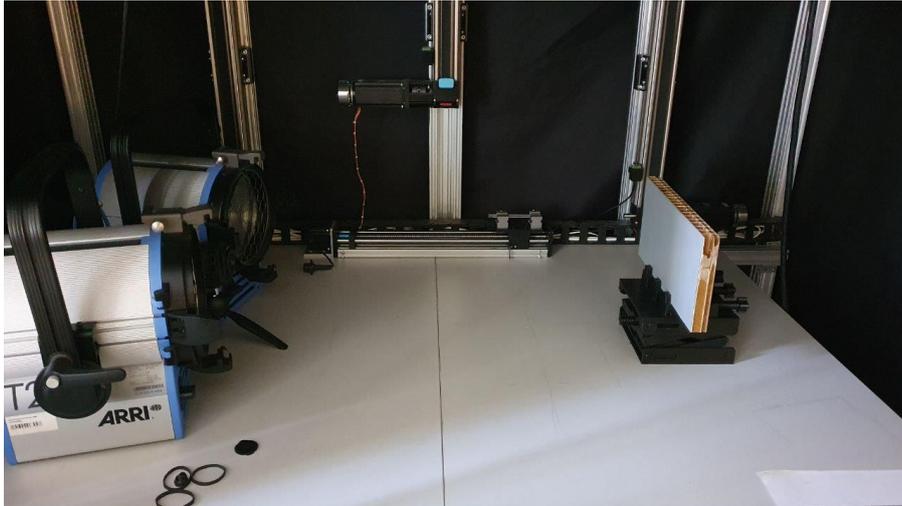
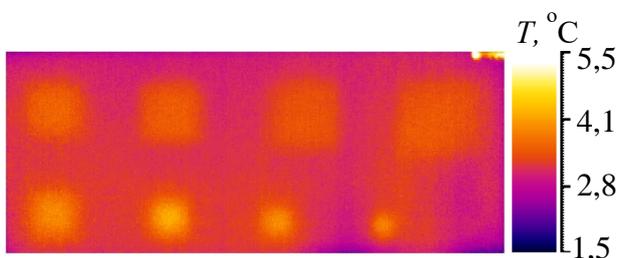
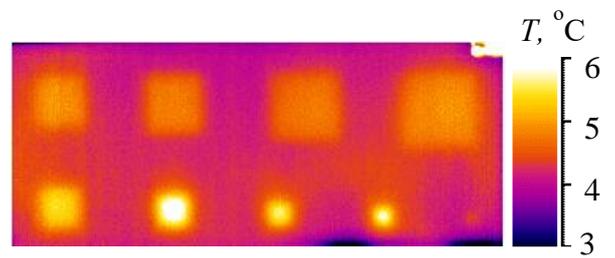


Рисунок 3.5 – Лабораторная установка для классической односторонней процедуры ТНК

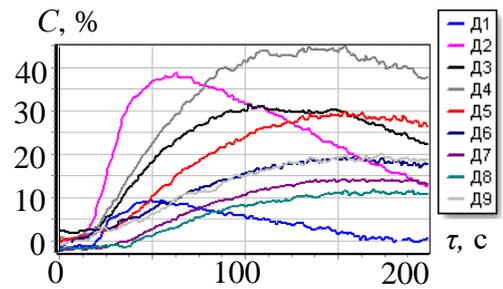
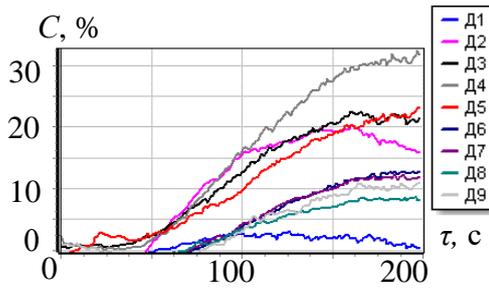
В качестве источников импульсного нагрева использовали две галогенные лампы суммарной мощностью 2 кВт. Длительность импульса нагрева составляла 10 секунд, длительность регистрации – 210 секунд. По результатам одностороннего ТНК (рисунок 3.6), при распределенном импульсном нагреве, были выявлены все дефекты контрольных образцов №1 и №2. При этом, величина температурного контраста C находилась в диапазоне 3,1 - 44,8 % (см. таблицу 3.5), а оптимальное время обнаружения дефектов τ_m находилось в диапазоне 126 – 198 секунд для образца №1 и 55 – 174 секунды для образца №2.



а) термограмма контрольного образца №1, 175-я секунда контроля



б) термограмма контрольного образца №2, 120-я секунда контроля



в) графики изменения температурных контрастов C , образец №1

з) графики изменения температурных контрастов C , образец №2

Рисунок 3.6 – Результаты одностороннего ТНК образцов №1 и №2 при импульсном распределенном нагреве

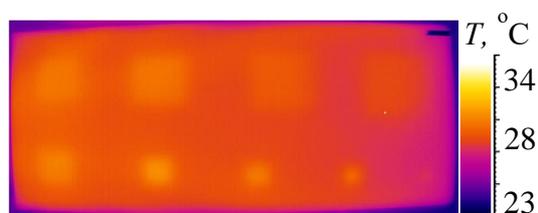
Таблица 3.5 – Результаты ТНК образцов №1 и №2 при импульсном распределенном нагреве

Параметр контроля	Поперечные размеры дефектов, мм								
	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7	Д8	Д9
	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30	35×35	40×40	45×45
Контрольный образец №1									
C , %	3,1	20,4	22,5	32,4	23,3	12,9	12,3	8,7	11,0
τ_m , с	126	161	160	197	198	184	184	195	198
Контрольный образец №2									
C , %	9,3	38,5	31,3	44,8	29,6	19,4	14,3	11,8	20,0
τ_m , с	55	62	102	154	153	153	174	169	173

Ввиду необходимости регистрации изменения температуры контрольных образцов №1 и №2 в диапазоне от 36 до 207 секунд (согласно результатам численного моделирования), в ходе ТНК с линейным непрерывным нагревом, запись термограмм начинали спустя 32 секунды с момента начала нагрева, т.е. сразу после «выхода» всей поверхности контрольного образца из зоны действия нагрева и его остановки. Таким образом, в ходе эксперимента контрольные образцы

перемещались относительно стационарно установленных тепловизора и линейного источника нагрева – галогенной лампы, после чего останавливались для регистрации температуры их поверхности на стадии охлаждения.

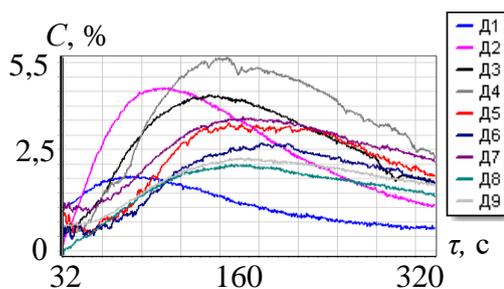
На рисунке 3.7 показаны термограммы контрольных образцов №1 и №2, а также соответствующие графики температурных контрастов C , полученные при использовании линейного источника нагрева. На термограмме контрольного образца №1 (рисунок 3.7 а), соответствующей 174-й секунде контроля, визуально распознаются все скрытые дефекты, включая дефект Д1 (оптимальное время проявления дефекта Д1 составляет 89 секунд, а уровень C составляет 1,6 %). В таблице 3.6 приведены оптимальные параметры обнаружения скрытых дефектов образцов №1 и №2.



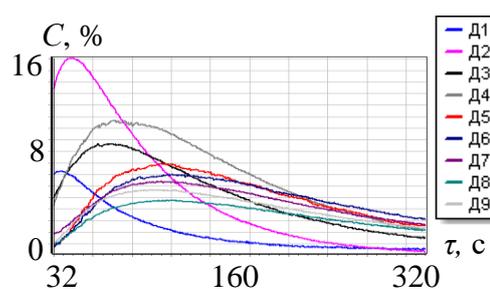
а) термограмма контрольного образца №1, 174-я секунда контроля



б) термограмма контрольного образца №2, 85-я секунда контроля



в) графики изменения температурных контрастов C , образец №1



г) графики изменения температурных контрастов C , образец №1

Рисунок 3.7 – Результаты ТНК образцов №1 и №2 при линейном распределенном нагреве

Таблица 3.6 – Оптимальные параметры обнаружения дефектов контрольных образцов №1 и №2 при нагреве линейным непрерывным источником

Параметр контроля	Поперечные размеры дефектов, мм								
	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7	Д8	Д9
	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30	35×35	40×40	45×45
Контрольный образец №1									
$C, \%$	1,6	4,6	4,4	5,7	3,4	2,7	3,6	2,0	2,2
$\tau_m, \text{с}$	89	128	165	181	183	213	196	185	200
Контрольный образец №2									
$C, \%$	6,3	16,1	8,7	10,7	7,0	6,0	5,4	3,8	4,7
$\tau_m, \text{с}$	38	45	72	87	131	140	126	140	122

Сравнивая экспериментальные результаты, полученные с использованием линейного непрерывного источника нагрева с результатами, полученными при импульсном распределённом нагреве, видно, что оба способа ТНК обеспечивают визуальное распознавание дефектов. Однако уровень температурных контрастов C при использовании линейного нагрева несколько ниже, чем при распределённом импульсе, что обусловлено особенностью конструкции линейного источника нагрева и меньшим количеством поглощенной энергии образцами. В частности, для дефектов контрольного образца №1 величина C варьируется в диапазоне от 1,6 до 5,7 %, в то время как в классической процедуре уровень C достигает 32,4 %, а по результатам численного моделирования, в зависимости от дефекта, меняется от 14,9 до 60,4 %. Для образца №2 при ТНК с использованием линейного источника нагрева уровень C находится в диапазоне от 3,8 до 16,1 %, для классической процедуры – в диапазоне от 9,3 до 44,8 %, а для результатов численного моделирования от 21,6 до 103 %. Более информативным параметром, с точки зрения дефектометрии, является время τ_m появления максимумов температурных контрастов C , которое для дефектов образца №1 варьируется в диапазоне от 89 до 213 секунд для линейного источника нагрева, от 126 до 198 секунд для импульсного распределённого нагрева и от 99 до 207 секунд для результатов численного

моделирования. Для дефектов образца №2 величина τ_m при ТНК с использованием линейного источника нагрева изменяется от 38 до 140 секунд, при импульсном распределённом нагреве изменяется в диапазоне от 55 до 173 секунд, а по результатам численного моделирования варьируется от 36 до 146 секунд. Таким образом, использование линейного источника нагрева обеспечило результаты, которые по параметру τ_m ближе к данным численного моделирования, что позволяет сделать косвенный вывод о достоверности потенциальных результатов дефектометрии.

3.4 Разработка методики реконструкции термограмм, полученных способом тепловизионного сканирования

Как было отмечено выше, результаты, полученные способом тепловизионного сканирования, представляют собой «урезанные» по времени результаты односторонней процедуры ТНК. В качестве примера на рисунке 3.8 приведен график температуры поверхности пластины из углепластика, соответствующий одностороннему ТНК, на котором голубым цветом выделен участком с 10 - й по 30 – ю секунды, показывающий диапазон времени, в течение которого происходит регистрация температуры при ТНК способом тепловизионного сканирования. Получаемые температурные данные движущегося, относительно тепловизора, объекта контроля, построчно преобразуют в последовательность стационарных для всех точек пространства температурных полей – панорамных изображений, каждая точка которых характеризуется постоянной временной задержкой относительно момента нагрева.

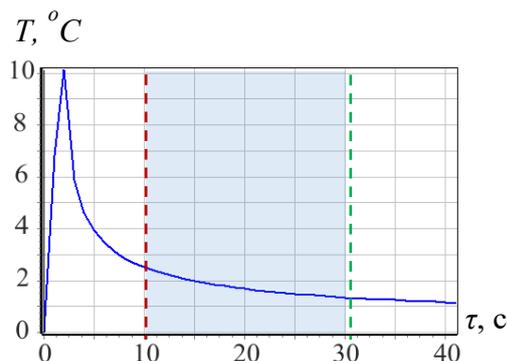


Рисунок 3.8 – График, описывающий изменение температуры поверхности объекта контроля в диапазоне от 0 до 42-й секунды, полученный при классической односторонней процедуре ТНК и зона от 10 до 30 секунды – диапазон времени, контролируемый способом тепловизионного сканирования

Каждое панорамное изображение «собирают» из строки или столбца исходной термограммы последовательности в зависимости от ориентации тепловизора относительно направления движения объекта контроля. Например, в границы поля зрения тепловизора с разрешением 320×240 пикселей, попадает объект контроля через 10 секунд после начала нагрева и находится в поле зрения тепловизора до 30 – й секунды. Первый из 320 столбцов термограммы соответствует 10-й секунде контроля (красная пунктирная линия на рисунке 3.8), а 320-й столбец соответствует 30 – й секунде процедуры контроля (зеленая пунктирная линия на рисунке 3.8). Таким же образом собирают последовательность из 320 панорамных изображений, соответствующих 20-и секундам процедуры контроля.

Следует отметить, что ТНК способом тепловизионного сканирования требует тщательной настройки параметров процедуры контроля, чтобы избежать пропусков и повторений при построении панорамных изображений. В частности, требуется корректно определить частоту записи термограмм таким образом, чтобы тепловизор записывал кадр при смещении объекта контроля на ширину столбца сканирования. Также необходимо определить скорость перемещения объекта контроля и масштаб изображения – ширину столбца сканирования в миллиметрах.

В качестве примера, на рисунке 3.9 приведена термограмма композитного образца с внутренними дефектами в виде плоскодонных утонений различной глубины, полученная в процессе ТНК способом тепловизионного сканирования. На термограмме с шагом в 3 пикселя показаны столбцы изображения, с помощью которых в дальнейшем были собраны соответствующие панорамные изображения. Количество выбранных столбцов термограммы исходной последовательности определяет количество панорамных изображений в результирующей последовательности.

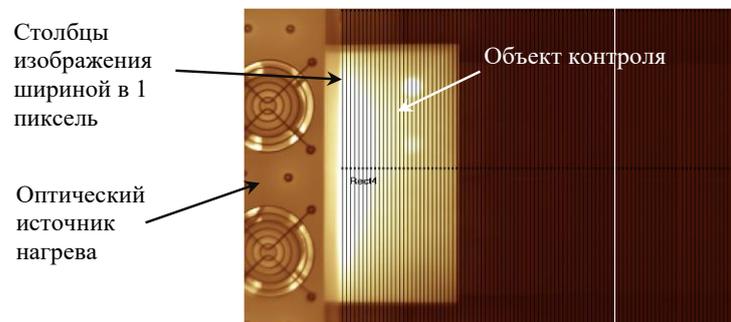
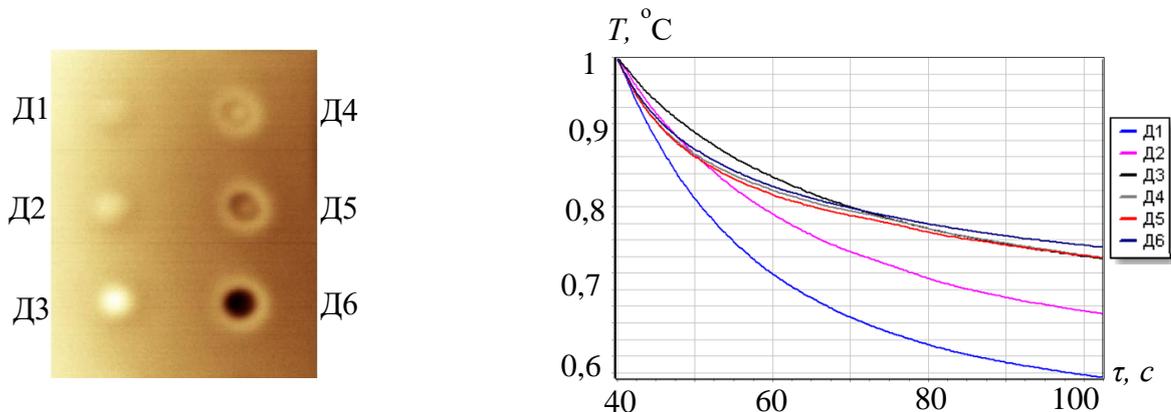


Рисунок 3.9 – Термограмма исходной последовательности, полученная при ТНК способом тепловизионного сканирования

Результаты ТНК способом тепловизионного сканирования показаны на рисунке 3.10. В частности, карта дефектов композитного образца (рисунок 3.10 а) отображает результат применения преобразования Фурье к реконструированной последовательности изображений, а графики температуры (рисунок 3.10 б), иллюстрируют динамику охлаждения объекта контроля в дефектных областях Д1 - Д6 в диапазоне от 40-й до 110-й секунды процедуры ТНК.

Как было отмечено выше, результаты ТНК, получаемые способом тепловизионного сканирования, а именно, графики изменения температуры, приведенные на рисунке 3.10 б, могут быть использованы для обработки алгоритмами на базе ИНС, что позволяет получить удовлетворительные результаты определения глубины залегания дефектов, а также их толщины. Разработка алгоритмов автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии с помощью ИНС,

а также соответствующие методики обучения и применения ИНС, описаны в Главе 4.



а) изображение фазы
(преобразование Фурье
реконструированной
последовательности термограмм)

б) графики изменения температуры
областей дефектов Д1-Д6 после
нормализации по первому кадру

Рисунок 3.10 – Результаты ТНК образца ПКМ, полученные способом тепловизионного сканирования при оптическом нагреве

3.5 Сравнение результатов классического одностороннего теплового контроля с результатами, полученными способом тепловизионного сканирования с помощью самодвижущегося теплового дефектоскопа

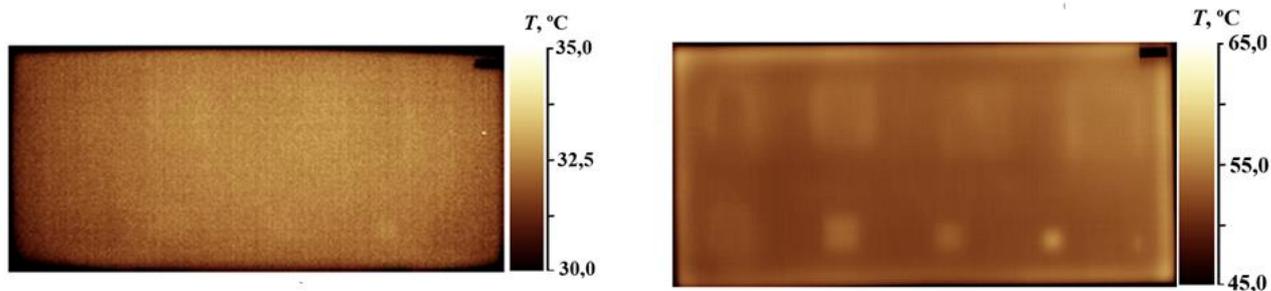
В настоящем разделе приведены результаты ТНК, полученные с помощью разработанного в рамках диссертационного исследования устройства – самодвижущегося теплового дефектоскопа [153], технические характеристики которого описаны в Главе 6.

Для сравнения двух способов ТНК, а именно, классического одностороннего ТНК с импульсным распределённым нагревом и способа тепловизионного сканирования с оптическим линейным непрерывным нагревом, реализованного с

помощью самодвижущегося теплового дефектоскопа, были использованы контрольные образцы №1 и №2, описанные выше (см. рисунок 3.4 и таблицу 3.3).

Ввиду конструктивных особенностей самодвижущегося теплового дефектоскопа, речь идет об ограничении диапазона времени регистрации температуры, определяемого положением тепловизионного модуля и углом зрения его объектива, путем регулировки скорости перемещения дефектоскопа по контролируемой поверхности, был настроен диапазон времени сканирования, который составил от 30-и до 110-и секунд с момента начала нагрева. При данной скорости движения дефектоскопа длительность нагрева каждой точки поверхности образца составляла 6 секунд. Для унификации параметров испытания в классической процедуре ТНК температуру образца регистрировали в диапазоне от 0 до 110 секунд при той же длительности нагрева. В обоих способах контроля нагревателями являлись галогенные лампы мощностью 2 кВт, а для регистрации температуры был использован тепловизор с матрицей 640×480 точек и температурной чувствительностью 40 мК.

На рисунке 3.11 приведены исходные термограммы, соответствующие 110-й секунде контроля, полученные способом классического одностороннего ТНК (рисунок 3.11 а) и способом тепловизионного сканирования (рисунок 3.11 б). Термограмма на рисунке 3.11 б получена путем реконструкции исходной последовательности термограмм по способу, описанному в разделе 3.4 настоящей Главы, без применения фильтрации и других алгоритмов, улучшающих выявляемость дефектов.



а) результат классической
односторонней процедуры ТНК

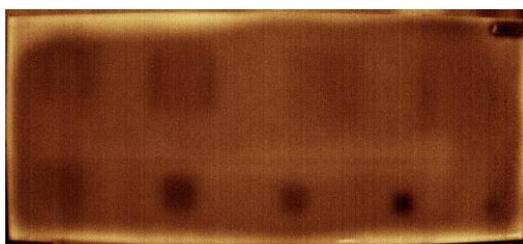
б) результат ТНК, полученный
способом тепловизионного
сканирования с помощью
самодвижущегося дефектоскопа

Рисунок 3.11 – Термограммы, соответствующие 110-й секунде ТНК
контрольного образца №1

Из рисунка 3.11 видно, что при одинаковом времени контроля результаты использования тепловизионного сканирования существенно лучше результатов, полученных в классической процедуре ТНК (визуально распознаются все 9 дефектов в сравнении с 2-3 дефектами при импульсном распределенном нагреве). Такой результат, кроме прочего, обусловлен более интенсивным и равномерным нагревом контролируемой поверхности с помощью линейного источника. Следует отметить, что длительность нагрева каждой точки образца в обеих процедурах ТНК составляла 6 секунд.

Важным фактором, влияющим на результаты ТНК, является наличие тепловых помех, в том числе, создаваемых источником нагрева. Как было отмечено ранее, для классической процедуры одностороннего ТНК характерно остаточное тепловое излучение ламп, которое приводит к искажению температурного поля контролируемой поверхности, снижает эффективность работы алгоритмов обработки данных и осложняет интерпретацию результатов контроля. В случае ТНК способом тепловизионного сканирования источник нагрева находится на заданном удалении от области, температуру которой регистрируют с помощью тепловизора.

Обработка результатов контроля (рисунок 3.12) с помощью МАГК существенно улучшила визуальную распознаваемость дефектов для обеих процедур ТНК: все дефекты контрольного образца №1 были обнаружены, в той или иной степени. Результаты, полученные с помощью самодвижущегося теплового дефектоскопа, характеризуются существенно бóльшими величинами отношения сигнал/шум S (таблица 3.7) по сравнению с классическим односторонним ТНК, что эквивалентно лучшей выявляемости дефектов и связано с более интенсивным и равномерным нагревом.



а) классический односторонний ТНК, изображение 2-й компоненты по МАГК



б) сканирующий ТНК, изображение 2-й компоненты по МАГК

Рисунок 3.12 – Результаты обработки данных ТНК контрольного образца №1

Таблица 3.7 – Сравнение способов ТНК по величине отношения сигнал/шум S (использованы изображения рисунка 3.12)

Номер дефекта	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7	Д8	Д9
Классическая односторонняя процедура ТНК									
S	3,5	10,5	9,2	9,0	3,5	2,4	3,1	1,1	2,0
ТНК способом тепловизионного сканирования									
S	24,5	60,1	42,3	34,5	10,7	5,4	15,4	13,0	8,3

Кроме бóльших величин отношения сигнал/шум S , ТНК способом тепловизионного сканирования обеспечивает существенно более высокую производительность испытаний крупногабаритных изделий, а использование самоходного дефектоскопа позволяет реализовать данный вид испытаний без

роботизированных манипуляторов, применение которых целесообразно, в основном, для контроля изделий со сложной геометрической формой.

3.6 Способ тепловизионного сканирования с использованием двух тепловизоров

На практике, основным недостатком способа тепловизионного сканирования, с точки зрения задач дефектометрии, является ограниченный диапазон времени, в течение которого происходит регистрация температурных полей движущегося относительно тепловизора объекта контроля. В связи с этим, в рамках настоящего диссертационного исследования, был предложен способ ТНК с использованием двух последовательно установленных тепловизионных модулей, расширяющих область регистрации температуры в пространстве и, следовательно, увеличивающий диапазон времени регистрации температурных полей. Такой подход является актуальным, в особенности, при испытаниях крупногабаритных объектов, внутренние дефекты которых могут быть распределены в значительном диапазоне глубин залегания (связь глубины залегания дефектов h и времени их появления τ_m описана уравнением (2.11)). Следует отметить, что «захват» большего временного диапазона, в течение которого объект контроля может находиться в поле зрения тепловизора может быть достигнут путем увеличения угла зрения тепловизора, что ограничено набором оптических линз конкретных моделей, а также увеличением расстояния от тепловизора до контролируемой поверхности, что, очевидно, приведет к снижению информативности результатов контроля с точки зрения пространственного разрешения.

На рисунке 3.13 приведена схема ТНК способом тепловизионного сканирования с использованием двух тепловизоров.

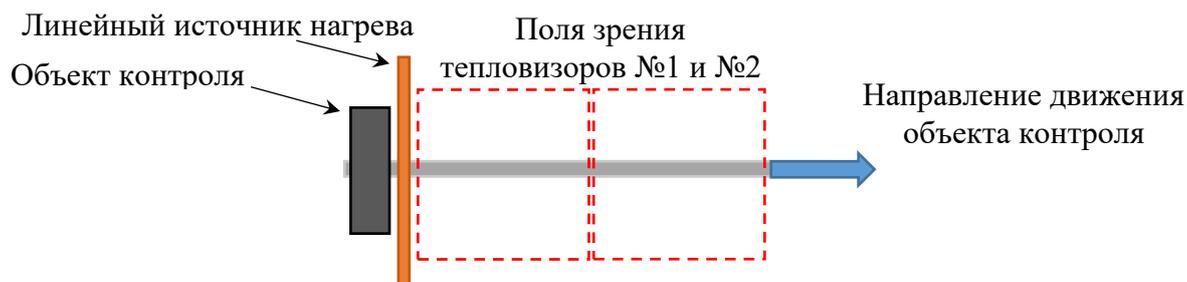


Рисунок 3.13 – Схема ТНК способом тепловизионного сканирования при использовании двух тепловизоров

Как и в случае с одним тепловизором, использование двух и более тепловизоров подразумевает реконструкцию исходных термограмм в последовательность панорамных изображений, которая далее может быть использована для математической обработки с целью дефектоскопии и дефектометрии. Экспериментальное исследование с двумя тепловизорами было проведено на лабораторной установке с линейным источником нагрева оптического типа – галогенной лампой мощностью 2 кВт и передвижной платформой (см. рисунок 3.14). Контрольные образцы №1 и №2 размещали друг рядом с другом на передвижной платформе таким образом, чтобы при заданной скорости движения (10 мм/с) они находились в полях зрения тепловизоров в диапазоне 10 – 100 секунд с момента начала контроля. Тепловизор №1 регистрировал температурные поля объектов контроля с 10-й по 58-ю секунды, а тепловизор №2 – с 52-й по 100-ю секунды процедуры контроля. Таким образом было обеспечено пространственно-временное перекрытие зоны стыка полей зрения тепловизоров.



Рисунок 3.14 – Экспериментальная установка ТНК способом тепловизионного сканирования с использованием двух тепловизоров

Для регистрации термограмм использовали тепловизионные модули одного типа с разрешением 382×288 элементов, установленные на расстоянии 750 мм от поверхности объектов контроля.

На рисунке 3.15 приведены термограммы контрольных образцов №1 и №2 в процессе ТНК. Искусственные дефекты контрольного образца №2, расположенные близко к поверхности, как и ожидалось, «появились» в поле зрения тепловизора №1 (см. рисунок 3.15 а). Скрытые дефекты контрольного образца №1 стали появляться в диапазоне между 75-й и 85-й секундами контроля (соответствующая зона обозначена на рисунке 3.15 б красной пунктирной линией), находясь в поле зрения тепловизора №2.

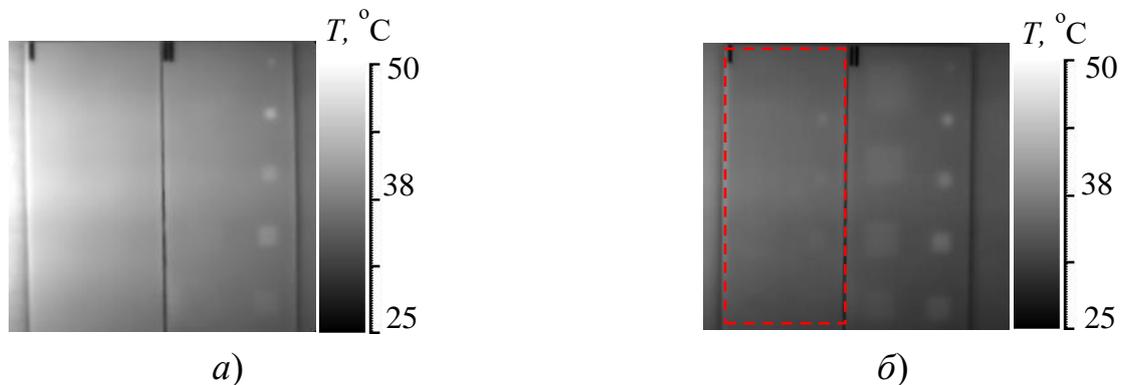
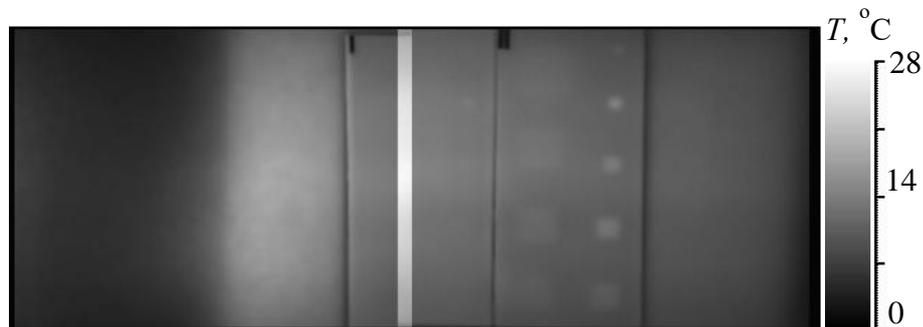
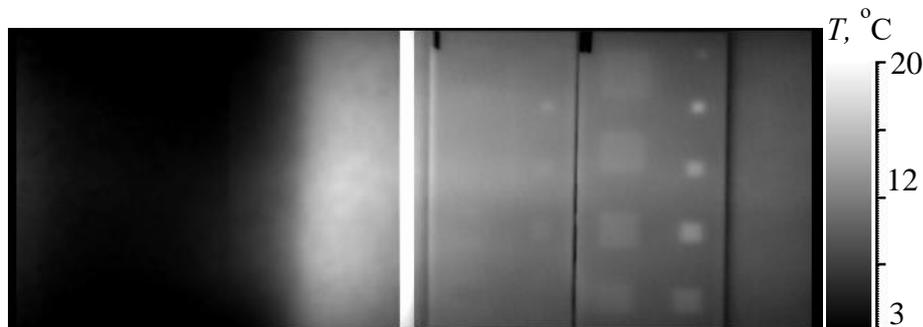


Рисунок 3.15 – Термограммы образцов №1 и №2, полученные способом тепловизионного сканирования с помощью тепловизора №1 (а) и №2 (б)

На рисунке 3.16 приведены панорамные термограммы, полученные путем пространственной «сшивки» температурных данных от двух тепловизоров. Обработку проводили с использованием оригинального программного модуля DualCam (ТПУ, г. Томск). В частности, на рисунке 3.16 *а* виден незначительных сдвиг изображений, связанный со смещением тепловизоров относительно продольной оси движения контрольных образцов, а также полосу перекрытия двух изображений, пиксельные значения которой соответствуют сумме температурных значений перекрываемых областей термограмм.



а) изображение 60-й секунды ТНК

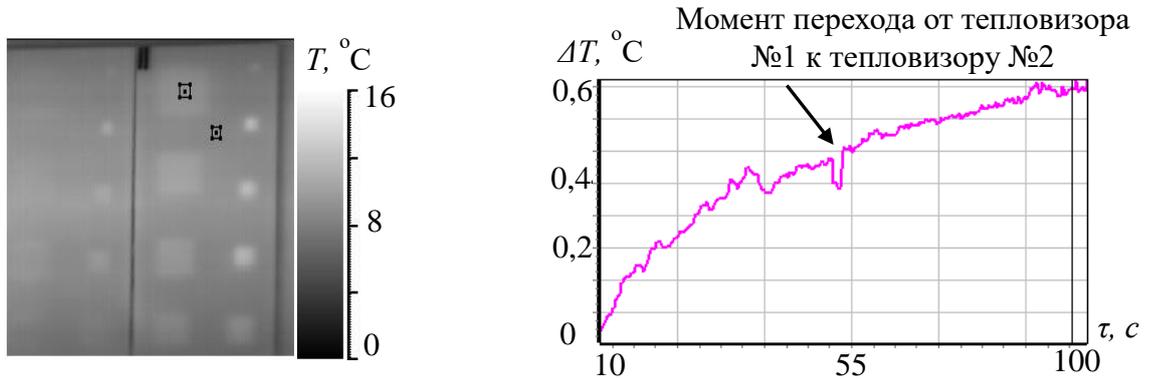


б) изображение 80-й секунды ТНК

Рисунок 3.16 – Панорамные изображения, полученные путем пространственной сшивки последовательностей термограмм, зарегистрированных тепловизорами №1 и №2

Изображение контрольных образцов №1 и №2 реконструированной последовательности, соответствующее 80-й секунде ТНК способом тепловизионного сканирования, приведено на рисунке 3.17 *а*, а график

температурного сигнала ΔT в зоне дефекта Д9 контрольного образца №2, показан на рисунке 3.17 б.



а) изображение реконструированной последовательности для 80-й секунды контроля

б) график изменения температурного сигнала ΔT для дефекта Д9 контрольного образца №2

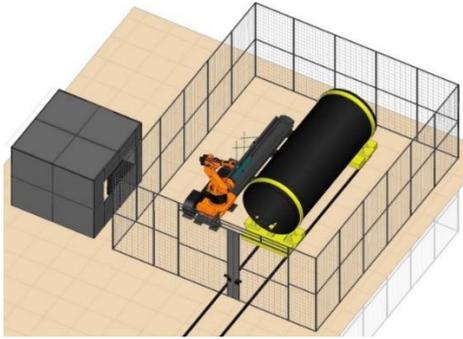
Рисунок 3.17 – Результаты ТНК способом тепловизионного сканирования с использованием двух тепловизоров

Полученные результаты демонстрируют, что ТНК способом тепловизионного сканирования обеспечивает высокую производительность испытаний, а одновременное применение нескольких тепловизоров позволяет расширить временной диапазон регистрации тепловых процессов с целью контроля дефектов, расположенных в различном диапазоне глубин, без потери пространственной информативности, по сравнению с использованием одного тепловизора. Получаемые в результате реконструкции данные пригодны для применения различных математических алгоритмов автоматизированной обработки, в том числе на базе ИНС (использование ИНС для автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии описано в Главе 4).

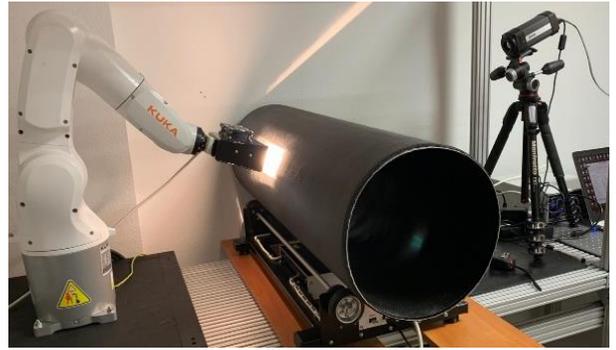
3.7 Тепловой неразрушающий контроль крупногабаритных цилиндрических изделий способом тепловизионного сканирования

Как отмечено выше, основной целью разработки способа тепловизионного сканирования, а также соответствующей методики его реализации (приведена в Приложении В), являлось обеспечение высокопроизводительного ТНК крупногабаритных металлических цилиндров с нанесенным на внешнюю поверхность образующей теплозащитным слоем.

Особенностью реализации процедуры ТНК изделий цилиндрической формы является организация перемещения контролируемой поверхности относительно поля зрения тепловизора и источника линейного нагрева. В случае с цилиндрическим изделием, представляющим собой, например, отрезок трубы, перемещение контролируемой поверхности относительно поля зрения тепловизора может быть реализовано путем вращения цилиндра вокруг его продольной оси с равномерной скоростью. Для этого может быть использована роликовая платформа, на которой цилиндрический объект контроля размещают горизонтально и приводят во вращение с помощью электромотора. Средства контроля, а именно, тепловизор и источник нагрева, располагают на заданном расстоянии от контролируемой поверхности и на заданном расстоянии относительно друг друга, что определяет длительность задержки – времени от момента начала нагрева до момента начала регистрации температуры поверхности объекта контроля [152]. Трехмерная модель и вид лабораторной установки для ТНК цилиндрических изделий способом тепловизионного сканирования с использованием роботизированного манипулятора, с размещенным на него источником нагрева и тепловизором, приведены на рисунке 3.18.



а) трехмерная модель
роботизированной установки



б) вид лабораторной установки

Рисунок 3.18 – Установки ТНК цилиндрических изделий способом
тепловизионного сканирования

С точки зрения получаемых результатов, ТНК цилиндра не отличается от ТНК пластины, а реализация контроля также подразумевает условное деление объекта на отдельные области сканирования (в случае ТНК цилиндра - на кольцевые области), ширину которых определяет длина источника нагрева и размер поля зрения тепловизора. Результатом ТНК отдельной кольцевой области цилиндрического объекта является последовательность термограмм, которую реконструируют в последовательность панорамных изображений и обрабатывают с использованием пространственно-временных алгоритмов или автоматизированных алгоритмов на базе ИНС.

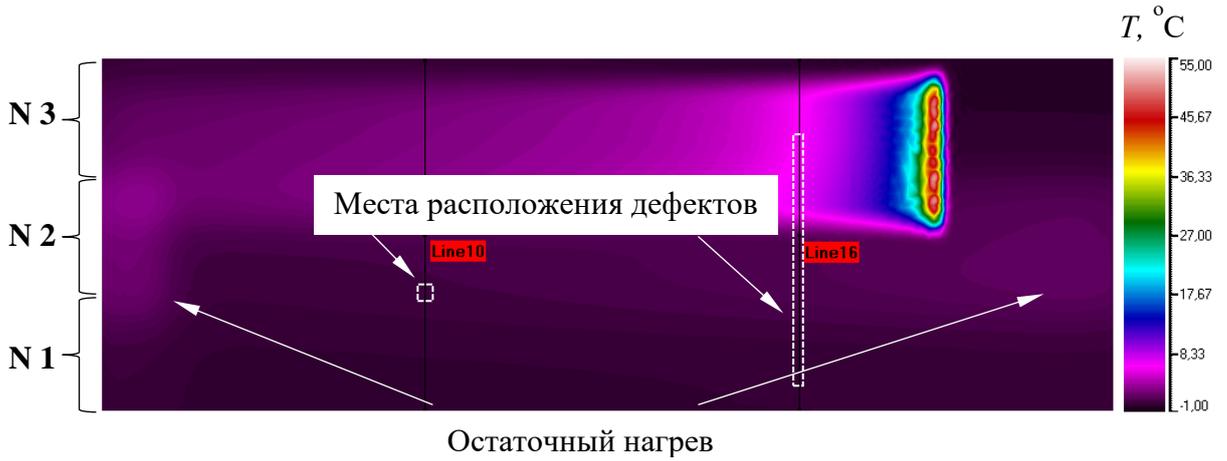
Для реализации ТНК цилиндра, длина образующей которого превышает длину источника нагрева и соответствующий ей размер поля зрения тепловизора, требуется смещение средств контроля вдоль образующей цилиндра с целью ТНК его оставшейся части. В итоге, всю поверхность цилиндра «собирают» из отдельных кольцевых областей, соседние из которых, частично перекрывают друг друга для исключения пропуска дефектов.

На практике, в процессе ТНК крупногабаритных цилиндров возникает неравномерность температурного поля контролируемой поверхности, вызванная влиянием диффузии тепла проконтролированной кольцевой области на соседнюю

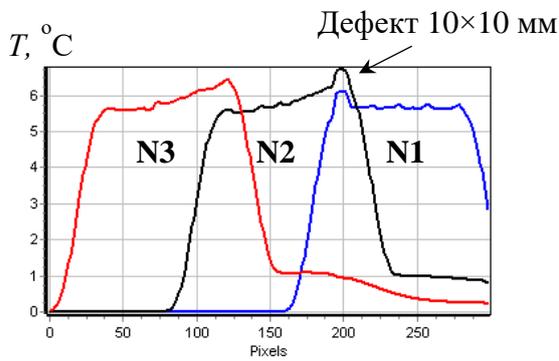
кольцевую область, что существенно ухудшают результаты ТНК. Решением данной проблемы является проведение ТНК с чередованием кольцевых областей, например, по схеме «одна через одну».

Целесообразность чередования кольцевых областей при ТНК крупногабаритных цилиндров способом тепловизионного сканирования продемонстрирована на результатах численного моделирования, проведенного в программном обеспечении Comsol Multiphysics (экспериментальные данные ТНК крупногабаритных цилиндров с теплозащитным покрытием не приведены ввиду соблюдения договора о конфиденциальности).

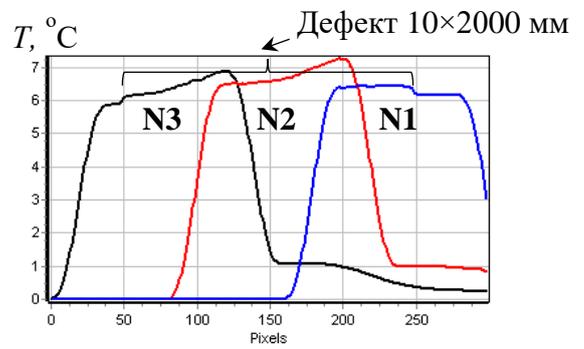
На рисунке 3.19 *а* приведена термограмма развертки цилиндра, условно разделенного на 3 кольцевые области (N1-N3), которая демонстрирует процесс ТНК области N3 с использованием линейного источника нагрева. Приведенная термограмма характеризует результат ТНК, полученный при последовательном контроле кольцевых областей: сначала N1, затем N2 и N3. В области N2 имеет место остаточный нагрев, искажающий температурное поле контролируемой области N3, что хорошо видно на температурных профилях (рисунок 3.19 *б, в*), соответствующих 100-й секунде ТНК (линии построения профиля – Line 10 и Line 16). Следует отметить, что линии Line 10 и Line 16 проходят через зоны внутренних дефектов размерами 10×10 мм и 10×2000 мм и толщиной 0,5 и 0,3 мм соответственно, расположенные на глубине 5,5 мм от контролируемой поверхности. Подобная неоднородность температурного поля существенно затрудняет идентификацию температурных индикаций, обусловленных наличием внутренних дефектов.



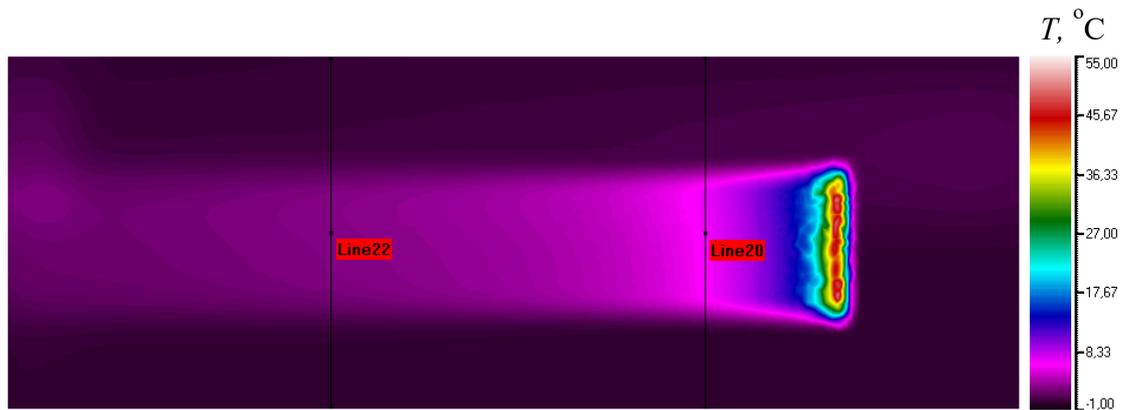
а) результат контроля областей N1, N2, N3, процесс ТНК области N3



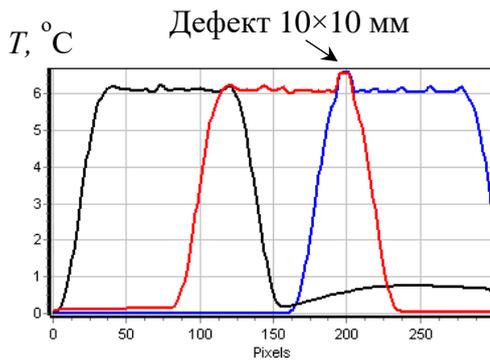
б) профили температуры по линии
Line 10 для (а)



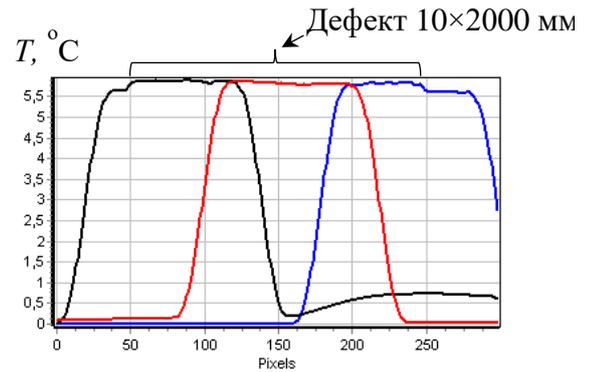
в) профили температуры по линии
Line 16 для (а)



г) результат контроля областей N1, N3, N2, процесс ТНК области N2



д) профили температуры по линии
Line 22 для (з)



е) профили температуры по линии
Line 20 для (з)

Рисунок 3.19 – Результаты численного моделирования процедуры ТНК с различной последовательностью контроля кольцевых областей

На рисунке 3.19 з-е приведены результаты ТНК кольцевых областей, выполненного в последовательности N1, N3, N2 (следует отметить, что перед проведением контроля кольцевой области N2 была выдержана пауза, равная по длительности процедурам контроля условных пятой и седьмой кольцевых областей). Видно, что ТНК с чередованием кольцевых областей не привело к «перекосам» температурных полей, в результате чего локальные температурные индикации лучше идентифицируются, особенно при низком уровне температурных сигналов, что повышает достоверность ТНК и упрощает процедуру обработки результатов контроля.

Следует отметить, что для получения равномерного температурного поля результирующего панорамного изображения необходимо учитывать время возвращения температуры контролируемой поверхности до исходной. Строго говоря, если выдерживать достаточную паузу между ТНК каждой кольцевой области (для изделия металл-теплозащита температура контролируемой поверхности, нагретой до избыточной температуры +50 °С, опустится до начальной примерно за 3300 секунд; к примеру, для изделия из угле- и стеклопластика потребуется примерно 4500 секунд), то контроль можно проводить без их

чередования. Однако на практике, такой подход негативно сказывается на производительности ТНК. Например, если при ТНК одной кольцевой области цилиндрического изделия типа металл-теплозащита требуется примерно 1100 секунд с учетом поперечного перекрытия начального участка контроля и времени на переход от одной кольцевой области до другой, то целесообразно ТНК кольцевых областей проводить в последовательности 1, 3, 5, 7, 2, 4 и т.д. (в случае если длина изделия меньше 7-и условных кольцевых областей, то следует увеличить длительность перехода от одной области до другой).

Для большей наглядности целесообразности чередования кольцевых областей при ТНК крупногабаритных цилиндров, а также плоских объектов, на рисунке 3.20 приведены «сшитые» панорамные изображения трех проконтролированных кольцевых областей N1-N3.

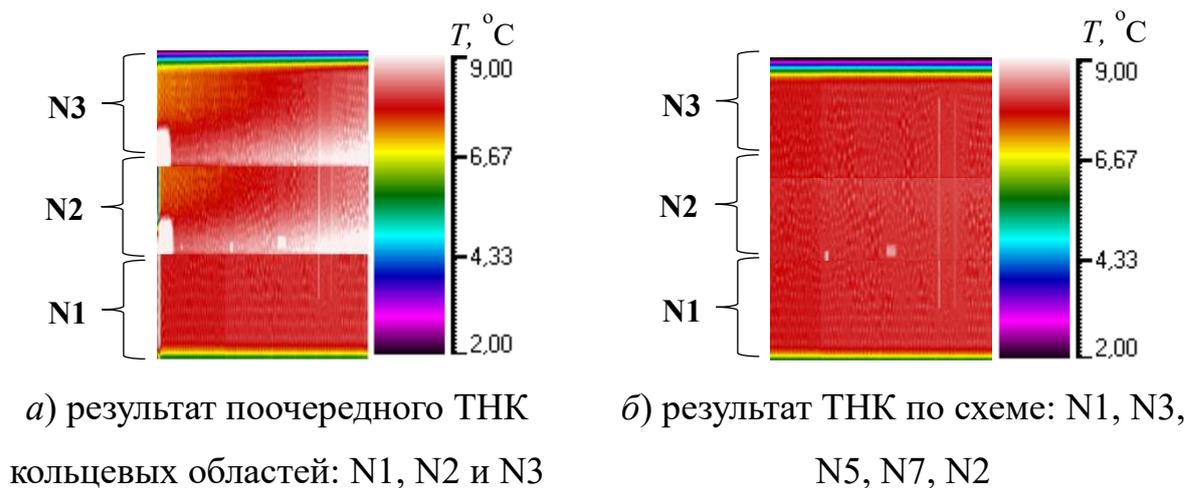


Рисунок 3.20 – Панорамные изображения, «сшитые» из трех кольцевых областей цилиндрического объекта, соответствующие 100-й секунде ТНК

Оба панорамных изображения собраны из строк исходных последовательностей термограмм, соответствующих 100-й секунде с момента окончания нагрева. Результат ТНК, полученный при чередовании кольцевых областей, характеризуется равномерным температурным полем

(см. рисунок 3.20 б), на котором надежно выявляются температурные индикации от внутренних дефектов, при высокой производительности ТНК.

3.8 Выводы по Главе 3

Разработан и подтвержден результатами численного моделирования и экспериментальных исследований новый способ ТНК крупногабаритных цилиндрических и плоских изделий с использованием тепловизионного сканирования (патент РФ №2774040С1 «Способ теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий»).

По результатам численного моделирования определено соответствие результатов ТНК при использовании линейного непрерывного движущегося нагрева результатам контроля, полученным в классической односторонней процедуре с импульсным распределенным нагревом.

Разработаны методика и соответствующий программный модуль для реконструкции результатов ТНК, полученных способом тепловизионного сканирования в последовательности панорамных изображений, соответствующих классической процедуре ТНК (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «ThermoScan» №2021664038).

Продемонстрировано, что ТНК способом тепловизионного сканирования обеспечивает повышение отношения сигнал/шум, т.е. улучшает выявляемость дефектов, за счет более равномерного нагрева и снижения тепловых помех со стороны источников нагрева.

Разработана методика ТНК цилиндрических крупногабаритных изделий способом тепловизионного сканирования (приведена в Приложении В). Предложено проводить ТНК с чередованием последовательности кольцевых областей, что обеспечивает равномерное температурное поле и, соответственно, большую достоверность получаемых результатов.

Разработано оригинальное устройство ТНК способом тепловизионного сканирования – самодвижущийся тепловой дефектоскоп, обеспечивающий

контроль плоских горизонтально ориентированных крупногабаритных изделий с производительностью до 15 м² в час (патент РФ №2786045С1 «Сканирующий тепловизионный дефектоскоп»).

Разработано роботизированное устройство для ТНК крупногабаритных цилиндрических изделий с теплозащитным покрытием способом тепловизионного сканирования, обеспечивающее производительность испытаний до 25 м² в час (патент РФ №2697437С1 «Устройство для теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий»).

ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТНК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ НА БАЗЕ ИНС

Практическое применение ТНК связано с развитием соответствующих устройств для реализации различных способов испытаний, а также программного обеспечения для обработки получаемых результатов. Например, для ТНК крупногабаритных объектов, а также серийных изделий, целесообразно применять роботизированные тепловые дефектоскопы, которые обеспечивают проведение испытаний в автоматизированном режиме с высокой повторяемостью и производительностью. Такие системы целесообразно оснащать программным обеспечением с возможностью автоматизированной обработки данных, которая позволяет снизить субъективность оценки и разброс получаемых результатов. Следует отметить, что типичное для классической односторонней процедуры ТНК количество термограмм в последовательности составляет от 1-й до 2-х тысяч, а при реализации ТНК способом тепловизионного сканирования, в зависимости от используемого тепловизора, в среднем, составляет до 640 панорамных изображений (количество пикселей в таких панорамных изображениях может достигать нескольких миллионов). Таким образом, при ТНК объектов, характеризующихся относительно небольшой площадью контроля (до 5 м²), возникает весьма объемный массив данных, что определяет необходимость разработки программного обеспечения для дефектоскопии и дефектометрии в автоматизированном режиме.

В настоящей Главе описано применение разработанного и экспериментально апробированного программного алгоритма автоматизированной обработки данных, основанного на использовании ИНС. Следует отметить, что предварительные этапы разработки алгоритмов автоматизированной обработки данных ТНК, были описаны в диссертациях Московченко А.И. [7] и Шагдырова Б.И. [8], выполненных под руководством Соискателя и при его непосредственном участии.

Основным отличием предложенного Соискателем способа автоматизированной обработки результатов ТНК с использованием ИНС от

известных способов, основанных на пространственном анализе термограмм, а именно, поиске температурных аномалий по характерным формам, размерам и контрастности [105, 156-158], является анализ динамики изменения температуры во времени для каждой точки последовательности термограмм. Например, последовательность термограмм, полученная в классической односторонней процедуре ТНК с помощью тепловизора с разрешением 640×480 точек, состоящая из 500 изображений, содержит более чем 150 млн. температурных значений, динамика изменения которых используется для автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии. Предложенный подход характеризуется достоверностью обнаружения дефектов вне зависимости от формы температурной индикации, а также контрастности дефектного «отпечатка», которую может регулировать оператор. Кроме того, анализ динамики температурных значений, в отличие от анализа пространственных характеристик дефектных отпечатков, обеспечивает определение параметров дефектов, а именно, глубины их залегания и толщины.

Основным недостатком алгоритмов на базе ИНС является необходимость соблюдения соответствия условий и параметров проведения ТНК тем, при которых были получены исходные данные для обучения ИНС. Данный факт объясняет относительно низкую эффективность использования результатов моделирования для обучения машинного интеллекта с целью дальнейшей обработки реальных экспериментальных данных. Тем не менее, такой подход выглядит привлекательным как для ТНК, так и других видов НК и требует проведения дополнительных исследований.

4.1 Автоматизированная дефектометрия с использованием ИНС, обученных на экспериментальных данных и результатах моделирования

Текст данного раздела адаптирован из статьи [149]. Использование результатов моделирования для обучения ИНС позволяет избежать необходимость проведения большого количества экспериментальных исследований и оперативно накапливать

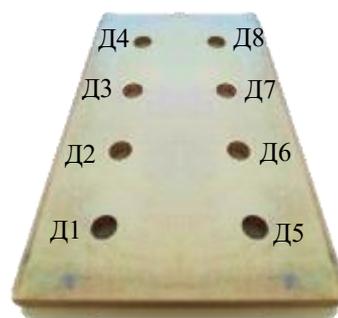
набор дефектных ситуаций с различными вариациями по типам и параметрам ожидаемых дефектов. При этом, созданная модель должна соответствовать материалам, которые максимально близки по ТФХ натурному объекту контроля, дефектоскопию и дефектометрию которого необходимо провести (это является достаточно проблематичной задачей, ввиду чего применение ИНС, обученных на экспериментальных данных, обеспечивает меньшую погрешность обнаружения дефектов и определений их параметров). Кроме того, в модели должны быть учтены все особенности процедуры проведения ТНК: мощность и длительность импульса нагрева, коэффициенты теплоотдачи, а также наличие характерных температурных шумов.

В настоящем разделе описаны результаты дефектоскопии и дефектометрии контрольного образца №3, полученные с использованием ИНС, обученной на экспериментальных данных и на результатах аналитического моделирования.

Контрольный образец №3 представлял собой пластину из стеклопластика размерами 232×140 мм, толщиной 16 мм, и содержал 8 плоскодонных дефектов диаметром 20 мм и глубиной от 8,7 до 15,7 мм. Внешний вид образца, лицевая сторона которого была окрашена краской черного цвета для исключения влияния частичной прозрачности материала в видимом диапазоне спектра излучения, показан на рисунке 4.1.



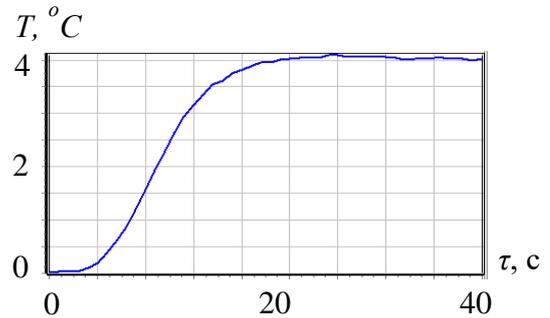
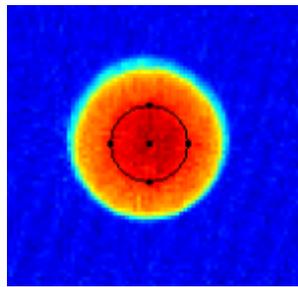
а) лицевая сторона



б) обратная сторона с плоскодонными отверстиями

Рисунок 4.1 – Контрольный образец №3 с искусственными дефектами в виде плоскодонных отверстий

Для создания численной модели контрольного образца №3 (для моделирования было использовано программное обеспечение ThermoCalc 3D Pro) экспериментальным путем были определены ТФХ его материала. В частности, по методу Паркера [159, 160] в двухсторонней процедуре ТНК был определен коэффициент температуропроводности стеклопластикового ПКМ. Термограмма области дефекта Д5 и соответствующий график изменения температуры - классическая кривая Паркера, показаны на рисунке 4.2.



а) термограмма области дефекта Д5

б) график изменения температуры в области дефекта №5

Рисунок 4.2 – Результаты исследования ТФХ материала контрольного образца №3

Определенная экспериментальным путем величина температуропроводности a [$\text{м}^2/\text{с}$] была использована для вычисления теплопроводности λ [$\text{Вт}/\text{м}\times\text{C}^{\circ}$] (4.1), а затем и теплоёмкости C [$\text{Дж}/^{\circ}\text{C}\times\text{кг}$] (4.2) стеклопластикового ПКМ:

$$\lambda = W \times a \times \tau_h \times \varepsilon / T \times L, \quad (4.1)$$

где W [$\text{кВт}/\text{м}^2$] – поглощенная мощность нагрева, a [$\text{м}^2/\text{с}$] – коэффициент температуропроводности, τ_h [с] – время нагрева, ε – коэффициент излучения поверхности контрольного образца №3, T [C°] – избыточная температура, L [м] – толщина контрольного образца №3;

$$C = \lambda / a \times \rho, \quad (4.2)$$

где λ [Вт/м×С°] – коэффициент теплопроводности, a [м²/с] – коэффициент температуропроводности, ρ [кг/ м³] – плотность стеклопластикового ПКМ.

Для определения поглощенной образцом мощности нагрева W [кВт/м²] использовали контрольную медную пластину толщиной 0,51 мм с зачерненной поверхностью, ТФХ которой были известны.

В таблице 4.1 приведены ТФХ стеклопластикового ПКМ, определенные экспериментально и расчетным путем, которые были использованы при моделировании процедуры ТНК контрольного образца №3.

Таблица 4.1 – ТФХ стеклопластикового ПКМ контрольного образца №3

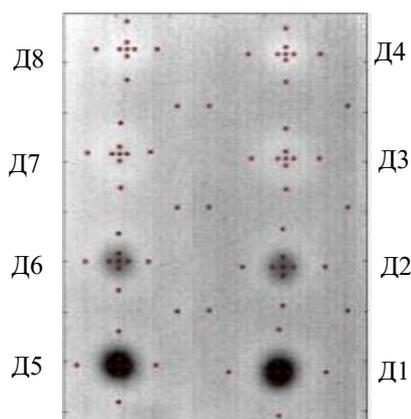
Параметр	Величина
a – [м ² /с] по координате Z	$6,00 \times 10^{-7}$
λ – [Вт/м × °С] по координате Z	0,48
C – [Дж/°С×кг]	481,9
ρ – [кг /м ³]	1660
W – [кВт/м ²]	5,619
T – [°С]	4,1
L –[м]	16×10^{-3}
τ –[с]	1
ε	0,94

4.1.1 Автоматизированная дефектоскопия и дефектометрия с использованием ИНС, обученных на экспериментальных данных

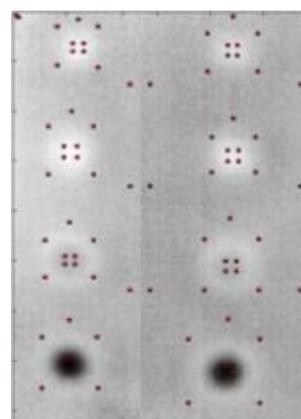
Обработку результатов контроля, а именно, автоматизированное обнаружение дефектов и определение их параметров, проводили с помощью разработанного в рамках настоящего диссертационного исследования программного модуля Thermo_NN [161], реализованного в программном обеспечении ThermoFit Pro [162].

В программном модуле Thermo_NN, была реализована ИНС прямого распространения, состоящая из пяти скрытых слоев с сигмоидальной функцией активации и числом нейронов 10, 15, 14, 10, 5 в слоях соответственно (сигмоидальная функция, согласно предыдущему опыту Соискателя и других научных групп, наилучшим образом подходит для выполнения задачи классификации температурных кривых). Выходной слой имел линейную функцию активации. Критерием выбора количества слоев и числа нейронов в них являлся компромисс между погрешностью определения глубины залегания дефектов и скоростью обучения ИНС [149].

Для обучения ИНС на ее вход подавали по пять групп температурных профилей, соответствующих областям каждого из дефектов Д1-Д8 контрольного образца №3 (каждая группа содержала по 16 температурных профилей, каждый из которых включал в себя по 1200 температурных значений), по четыре группы температурных профилей, соответствующих бездефектным областям (использовали области, окружающие каждую дефектную область), а также численные значения фактической толщины материала для дефектных и бездефектных областей, которые являлись «целями» обучения ИНС. На термограмме контрольного образца №3 (рисунок 4.3 а) красными точками показаны зоны, для которых получали температурные профили, подаваемые на вход ИНС для ее обучения. Для проверки качества обучения ИНС использовали ту же последовательность термограмм, что и для обучения, однако на вход ИНС подавали по 4 группы температурных профилей, соответствующих дефектным областям Д1-Д8, и по пять групп профилей, соответствующих бездефектным областям (зоны выбора групп температурных профилей показаны на рисунке 4.3 б).



а) зоны выбора температурных профилей, используемых для обучения ИНС



б) зоны выбора температурных профилей, используемые для проверки ИНС

Рисунок 4.3 – Схема расположения зон для формирования набора температурных данных, подаваемых на вход ИНС

Небольшие размеры зон сбора температурных профилей (рисунок 4.3), распределённых внутри дефектных областей, позволяют учитывать неравномерность температуры внутри этих области. Распределения зон сбора температурных профилей в бездефектной области, преимущественно вокруг дефектов Д1-Д8 и по периметру контрольного образца, позволяют учитывать неравномерность нагрева основной площади контролируемой поверхности, а также неравномерность температуры, обусловленную непосредственной близостью к дефектам.

Графики температурных профилей, соответствующие зонам красного цвета (см. рисунок 4.3 а), которые были использованы для обучения ИНС, показаны на рисунке 4.4. Следует отметить, что последовательность термограмм, температурные данные которой были использованы для обучения ИНС и проверки ее работоспособности, были нормированы в диапазоне от 0 до 1, а также обработаны с помощью МТОС, применение которого, по полученным Соискателем результатам, демонстрирует наименьшую погрешность определения глубины залегания скрытых дефектов [105].

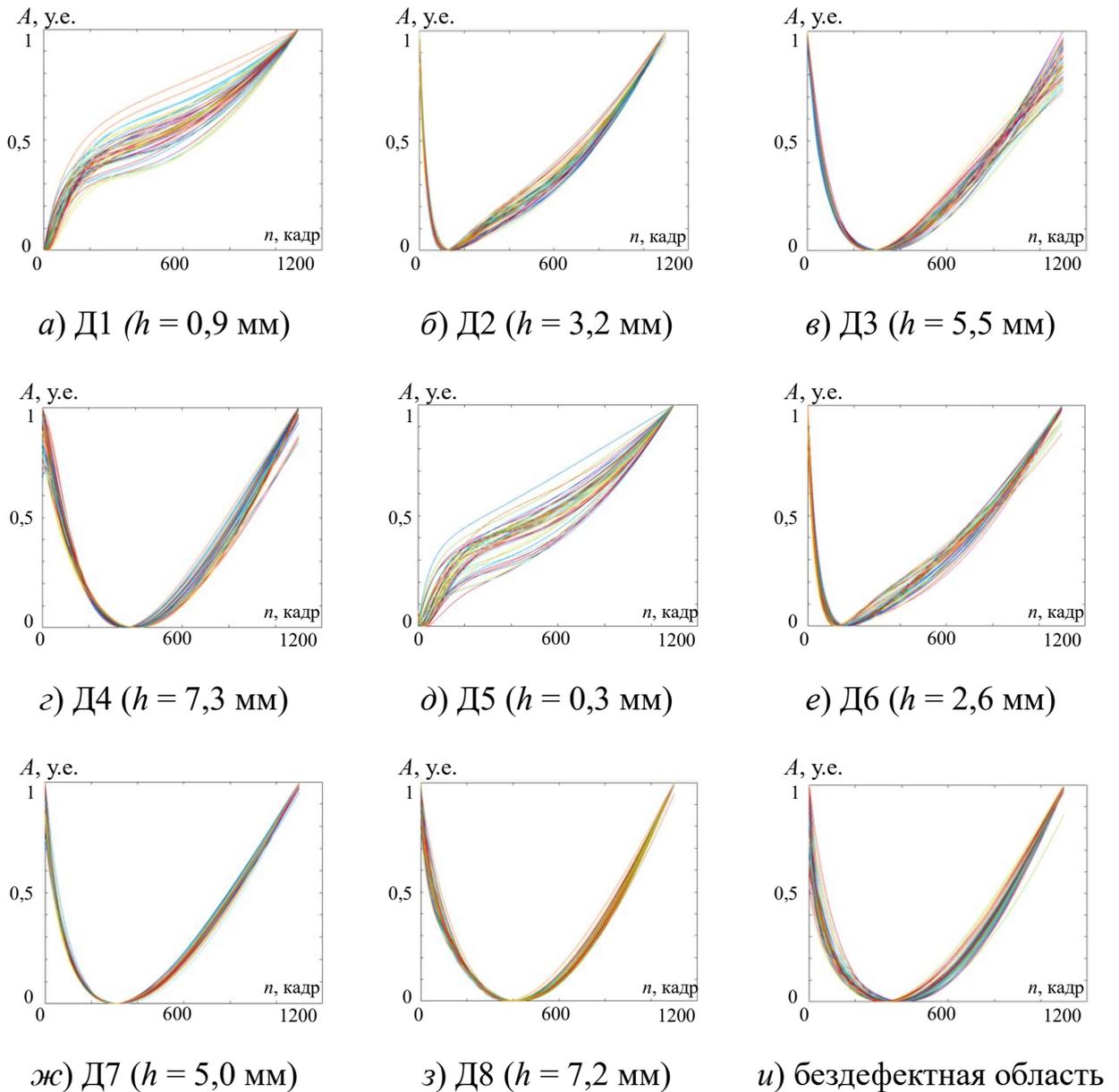


Рисунок 4.4 –Профили производных от температуры по времени для дефектных и бездефектной областей контрольного образца №3

В таблице 4.2 приведены результаты дефектометрии, полученные с помощью ИНС. Следует отметить, что приведённые в таблице данные характеризуют глубину залегания в зонах, показанных на рисунке 4.3 б. Отклонение глубины залегания дефектов σ от истинных значений рассчитывали по формуле (4.3).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h - h_{ci})^2}{n}}, \quad (4.3)$$

где h – истинная глубина конкретного дефекта; h_{ci} – усредненная глубина дефекта по каждой зоне для конкретной дефектной/бездефектной области; n – общее количество анализируемых зон для каждой дефектной/бездефектной области.

Таблица 4.2 – Результаты определения глубины залегания дефектов, с помощью ИНС

Дефект	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7	Д8	БД
h , мм	0,9	3,2	5,5	7,3	0,3	2,6	5,0	7,2	16
h_c , мм	0,65	2,89	5,53	7,63	0,60	2,89	5,21	8,22	11.50
	0,77	2,84	5,32	7,24	0,41	2,90	5,92	7,73	16.01
	0,65	2,87	5,46	7,24	0,63	2,89	5,12	7,97	...
	0,72	2,89	5,39	7,24	0,62	2,86	5,11	9,23	15.41
									16.02
h_{avg}	0,70	2,87	5,43	7,34	0,56	2,88	5,34	8,29	15,00
σ , мм	0,21	0,33	0,11	0,17	0,28	0,29	0,48	1,23	2,29

Как и следовало ожидать, наибольшей погрешностью определения глубины залегания h характеризуется один из наиболее глубоких дефектов - дефект Д8, для которого погрешность дефектометрии составила 1,23 мм. Следует отметить, что погрешность определения параметров дефекта Д4, расположенного на глубине 7,3 мм относительно контролируемой поверхности, меньше, чем для Д8, что обусловлено существенными температурными неоднородностями вследствие краевых эффектов в зоне Д8. Отклонение полученных значений глубины для бездефектной области составило 2,29 мм, что также связано с неоднородностью температурных данных, вызванных влиянием краевых эффектов.

На рисунке 4.5 приведена карта глубин контрольного образца №3, для построения которой на вход ИНС подавали температурные профили, соответствующие каждой точке обрабатываемой последовательности термограмм. Цвет шкалы карты дефектов соответствует глубине залегания дефектов в миллиметрах.

На практике, в том числе для оценки критичности дефектов, помимо информации о наличии и глубине залегания дефектов, важно иметь информацию об их координатах, поперечных размерах и занимаемой площади. Для этого, в программном обеспечении ThermoFit Pro был реализован автоматизированный алгоритм, с помощью которого по полученным картам глубин определяют интересующие параметры дефектов.

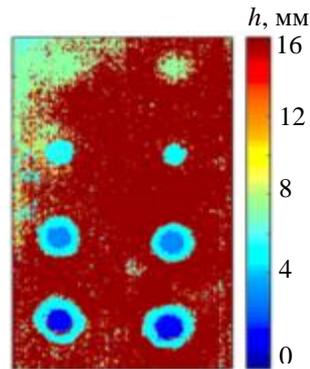


Рисунок 4.5 – Карта глубин дефектов контрольного образца №3

Алгоритм автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии, реализованный в программном обеспечении ThermoFit Pro заключается в следующем:

- 1) карту дефектов (рисунок 4.6 а) фильтруют от несвязанных сигналов – шума (см. рисунок 4.6 б), а затем бинаризуют, например, по порогу 0,1 (рисунок 4.6 в);
- 2) классифицируют обнаруженные дефекты, условно присваивая им порядковые номера (на рисунке 4.6 г дефекты окрашены различными цветами);
- 3) определяют поперечные размеры дефектов, описывая их прямоугольниками, а также занимаемую площадь дефектов, описывая их, например, окружностями (рисунок 4.6 д, е);
- 4) определяют координаты каждого дефекта по координатам центров соответствующих прямоугольных областей относительно точки привязки.

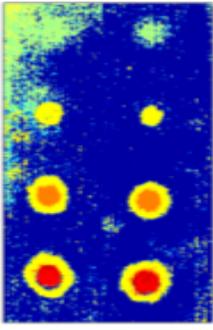
В таблице 4.3 приведены результаты дефектометрии контрольного образца №3. Ввиду того, что для автоматизированной обработки была использована только

одна карта глубин дефектов, оценка поперечных размеров глубоко расположенных дефектов показала существенную погрешность.

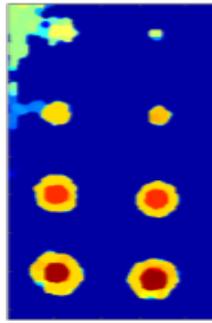
Таблица 4.3 – Результаты автоматизированной дефектометрии контрольного образца №3

Дефект №	Координаты центра дефекта, мм	Поперечные размеры дефекта d , мм эксп./истин.	Площадь дефекта, мм ² эксп./истин.	Глубина дефекта h , мм эксп./истин.
Д1	53×353	37×38 / 20×20	751 / 314	0,7 / 0,9
Д2	52×249	29×32 / 20×20	562 / 314	2,9 / 3,2
Д3	52×144	21×21 / 20×20	231 / 314	5,4 / 5,5
Д4	59×38	18×15 / 20×20	149 / 314	7,3 / 7,3
Д5	164×360	37×34 / 20×20	734 / 314	0,6 / 0,3
Д6	170×256	31×31 / 20×20	536 / 314	2,9 / 2,6
Д7	171×147	16×17 / 20×20	150 / 314	5,3 / 5,0
Д8	168×41	12×9 / 20×20	61 / 314	8,3 / 7,2

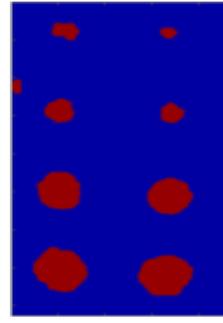
Дефекты Д4 и Д8, расположенные на глубинах 7,3 и 7,2 мм от контролируемой поверхности, на результирующих картах дефектов характеризуются диаметрами 15,9 и 10,2 мм, что составляет 80 и 51 % от истинной величины. Для этого, в целях автоматизированной дефектометрии целесообразно использовать полную последовательность термограмм, а сложение карт дефектов позволит учитывать в результирующем изображении размеры дефектных областей для различных времен наблюдения, что уменьшает погрешность дефектометрии.



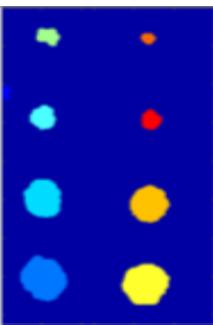
а) исходная карта глубин дефектов



б) карта глубин дефектов после фильтрации



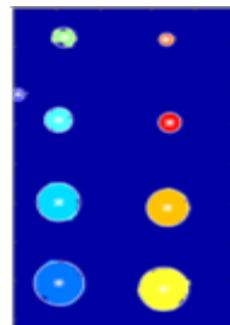
в) бинарная карта дефектов



г) карта дефектов с классифицированными областями



д) карта дефектов с прямоугольными областями для определения поперечных размеров дефектных областей



е) карта с дефектными областями, описанными окружностями, для определения их площади

Рисунок 4.6 – Этапы автоматизированной дефектометрии с использованием ИНС, обученной на экспериментальных данных

4.1.2 Автоматизированная дефектоскопия и дефектометрия с использованием ИНС, обученной на результатах моделирования

Как было отмечено выше, использование результатов моделирования позволяет оперативно «подготовить» ИНС для распознавания различных дефектных ситуаций, которые потенциально возможны в исследуемом объекте контроля. Однако такой подход требует строгого соответствия параметров моделирования экспериментальным параметрам ТНК, то же относится к ТФХ контролируемого образца. Ниже описан пример применения результатов аналитического моделирования для обучения ИНС с целью автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии контрольного образца №3.

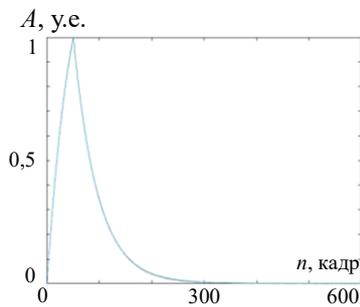
Для создания модели были использованы ТФХ контрольного образца №3, определенные экспериментальным путем (см. таблицу 4.1). Результатом моделирования являлись температурные профили (см. рисунок 4.7), соответствующие односторонней процедуре ТНК (параметры процедуры контроля, заданные в модели, полностью соответствовали параметрам экспериментальной процедуры ТНК). Ввиду того, что в контрольном образце №3 плоскодонные дефекты фактически представляли собой области с различной толщиной стеклопластикового ПКМ, путем моделирования были получены классические решения теории теплопроводности для передней поверхности пластин толщиной 0,1; 0,3; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1; 2; 3; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16 мм, нагреваемых равномерно-распределенным тепловым потоком прямоугольного импульса на стадии нагрева (4.4) и импульсом конечной длительности на стадии охлаждения (4.5). В модели был учтен конвекционный и радиационный теплообмен, а также аддитивный температурный шум с коэффициентом 0,5. Таким образом, были получены данные 20-и различных дефектных ситуаций, потенциально возможных для контрольного образца №3.

$$T = \frac{Q}{\alpha} \left(1 - \sum_{n=1}^{50} \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo} \right); \quad (4.4)$$

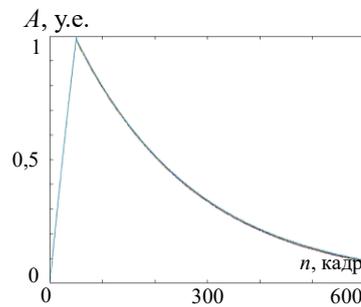
$$T = \frac{Q}{\alpha} \left(1 - \sum_{n=1}^{50} \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo} (e^{\mu_n^2 Fo_h} - 1) \right), \quad (4.5)$$

где, Q – мощность теплового потока; α – коэффициент теплоотдачи на передней поверхности; $Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$ критерий Био; $Fo = \frac{\alpha \tau}{L^2}$ критерий Фурье; $Fo_h = \frac{\alpha \tau_h}{L^2}$ критерий Фурье для нагрева конечной длительности; μ_n – положительные корни трансцендентного уравнения $\mu tg\mu = Bi$; L – толщина объекта контроля; λ – коэффициент теплопроводности стеклопластикового ПКМ; τ – длительность теплового процесса; τ_h – длительность импульса нагрева.

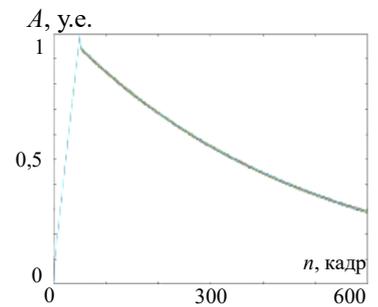
На рисунке 4.7 приведены некоторые температурные профили, полученные по результатам аналитического моделирования. Следует отметить, что в данном случае обучение ИНС проводили по исходным температурным данным, нормированным от 0 до 1, а не по производным от температуры по времени, как в случае с экспериментальными результатами. Такой выбор обусловлен определенным несоответствием теоретических температурных данных экспериментальным данным, которое усиливается после применения производной.



а) $h = 0,1$ мм



б) $h = 0,5$ мм



в) $h = 1$ мм

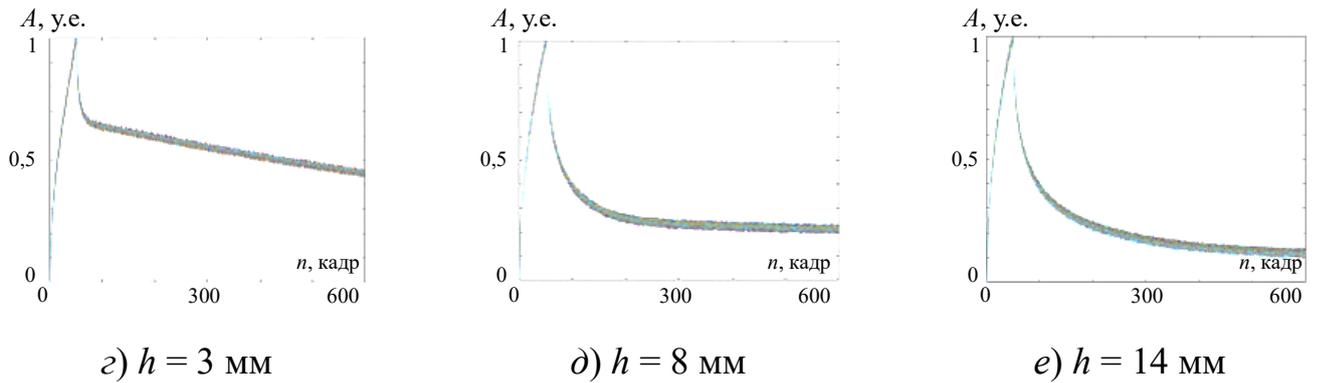


Рисунок 4.7 – Температурные профили, используемые для обучения ИНС (результаты моделирования)

На рисунке 4.8 а приведена карта глубин дефектов, полученная с помощью ИНС, обученной на результатах аналитического моделирования и примененная к экспериментальным данным (температурные данные последовательности термограмм, к которой применяли ИНС для обнаружения дефектов и определения их параметров, были нормированы от 0 до 1 без дополнительной обработки). На рисунке 4.8 б показана итоговая карта, на которой дефектные отметки были классифицированы и описаны прямоугольниками для дальнейшего определения их размеров, площади и координат.



а) карта глубин дефектов контрольного образца №3

б) результирующая карта дефектов

Рисунок 4.8 – Результаты автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии, полученные с помощью ИНС, обученной на данных аналитического моделирования

В таблице 4.4 приведены численные значения параметров выявленных дефектов Д1, Д2, Д5 и Д6 контрольного образца №3. Сравнивая результаты дефектометрии, полученные с помощью ИНС, обученной на экспериментальных данных (таблица 4.3), видно, что обучение на результатах моделирования демонстрирует лучшую корреляцию рассчитанных параметров дефектов с истинными параметрами. В частности, площадь дефектных отметок при обучении на модели отличаются от истинных в среднем на 8 %, в то время как при обучении на экспериментальных данных (в случае анализа последовательностей карт дефектов) среднее различие составляет 26 %. Тем не менее, ИНС, обученная на аналитических данных, позволила выявить только 4 дефекта из 8, однако на карте глубины дефектов (рисунок 4.8 а) визуальнo распознаются аномалии, которые затем были отфильтрованы по порогу 0,1.

Таблица 4.4 – Результаты автоматизированной дефектометрии контрольного образца №3, полученные ИНС, обученной на результатах аналитического моделирования

№ дефекта	Координаты центра дефекта, мм	Поперечные размеры d дефекта, мм эксп./истин.	Диаметр дефекта, мм эксп./истин.	Площадь дефекта, мм ² эксп./истин.	Глубина h дефекта, мм эксп./истин.
1	53×352	25×27 / 20×20	25 / 20	367 / 314	1,03 / 0,9
2	50×247	22×25 / 20×20	23 / 20	320 / 314	3,13 / 3,2
5	164×362	25×26 / 20×20	25 / 20	370 / 314	1,15 / 0,3
6	169×253	21×25 / 20×20	23 / 20	312 / 314	5,58 / 2,6

4.2 Практическая апробация разработанного алгоритма автоматизированной дефектометрии на базе ИНС с использованием контрольных образцов

Описанные выше методика и полученные результаты обработки данных продемонстрировали эффективность автоматизированных алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии на базе ИНС, обученной как на экспериментальных данных, так и на результатах моделирования. Несмотря на то, что обучение ИНС на результатах моделирования показало меньшую погрешность при определении поперечных размеров дефектов, величина погрешности по количеству обнаруженных дефектов и глубине их залегания меньше при обучении ИНС на экспериментальных данных. Как было отмечено выше, такой результат обусловлен различием температурных данных, которые были использованы для обучения ИНС по сравнению с данными, к которым она была применена. Следует подчеркнуть, что обучение и применение обученной ИНС проводили на экспериментальных результатах ТНК одного и того же образца, хоть и при использовании различных зон для сбора температурных профилей, подаваемых на вход ИНС. Очевидно, что такой подход, с практической точки зрения, малопригоден и может быть использован лишь для проверки работоспособности автоматизированного алгоритма обработки данных.

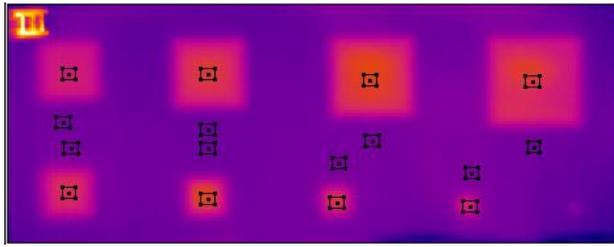
С целью проверки работоспособности разработанных методики и программного алгоритма, реализованного в программном обеспечении ThermoFit Pro, были проведены экспериментальные исследования, приближенные к их практическому применению. Для этого был использован набор из 22-х контрольных образцов №1, №2 и №4 – №23 (см. рисунок 4.9), суммарно содержащий 198 вариантов дефектных ситуаций, включающих различные поперечные размеры и глубины залегания дефектов (описание данного набора образцов приведено в [8]). Обучение ИНС проводили на экспериментальных данных – температурных профилях дефектных и бездефектных областей, полученных для контрольных образцов №4 – №23, а эффективность работы ИНС оценивали на экспериментальных данных контрольных образцов №1 и №2,

описанных ранее в Главе 3. Следует отметить, что дефекты контрольных образцов №1 и №2 представляли собой комбинацию различных дефектных ситуаций, встречающихся в контрольных образцах №4 – №23, а также были идентичными по ТФХ и конструкции данным образцам.

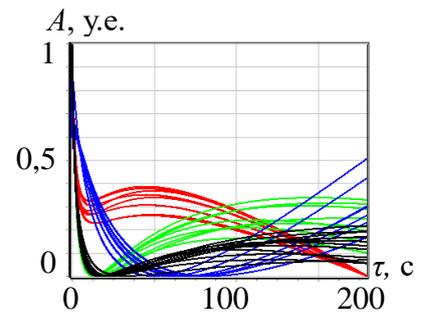


Рисунок 4.9 – Набор из контрольных образцов №1, №2 и №4 – №23, который был использован для практической апробации автоматизированного алгоритма дефектоскопии и дефектометрии, реализованный на базе ИНС (адаптировано из [8])

Все 22 образца были проконтролированы в идентичных условиях в классической односторонней процедуре ТНК с использованием оптических источников нагрева на лабораторной установке, показанной на рисунке 3.4 (Глава 3). Пример температурных профилей, соответствующих дефектным и бездефектным областям, а также расположение зон их сбора, показаны на рисунке 4.10. Следует отметить, что перед подачей на вход ИНС температурные профили были обработаны МТОС, а целями обучения ИНС являлись истинные глубины залегания дефектов и общая толщина материала бездефектной области.



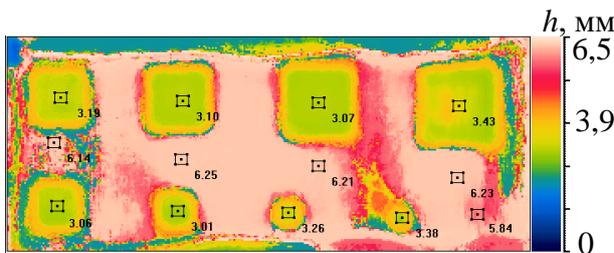
а) термограмма исходной последовательности контрольного образца №6 с выбранными зонами в дефектных и бездефектных областях



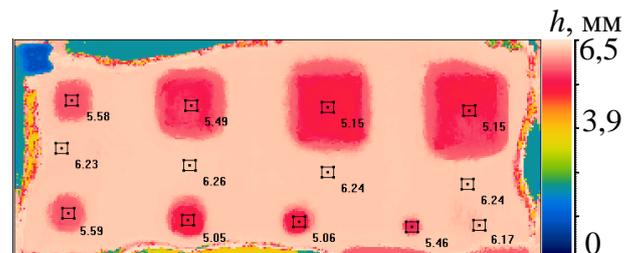
б) температурные профили, нормированные в диапазоне от 0 до 1, подаваемые на вход ИНС

Рисунок 4.10 – Выбор входных данных для обучения ИНС

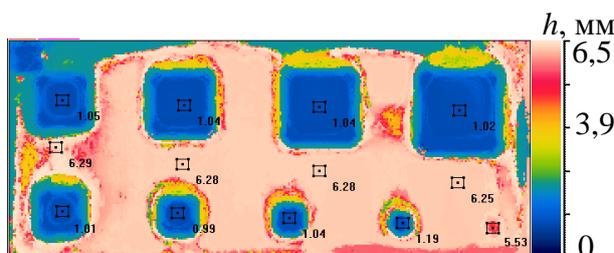
Результатом работы автоматизированного алгоритма дефектоскопии и дефектометрии являлись карты глубин дефектов (см. рисунок 4.11), цвета которых, согласно приведенным шкалам, соответствовали глубинам залегания дефектов в миллиметрах (численные значения на картах дефектов соответствуют глубинам в миллиметрах). Следует отметить, что, помимо искусственных дефектов, полученные карты содержат информацию о естественных расслоениях, в основном, локализованных по периметру контрольных образцов.



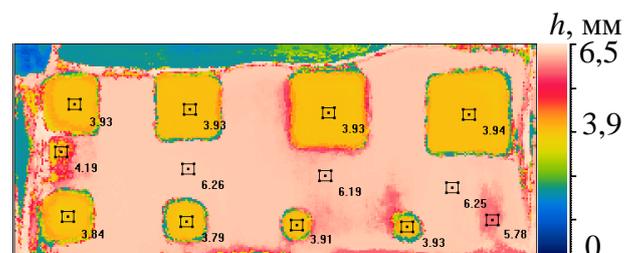
а) образец №4 ($h = 3,1$ мм)



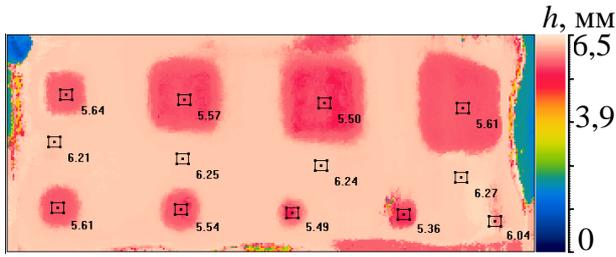
б) образец №5 ($h = 5,2$ мм)



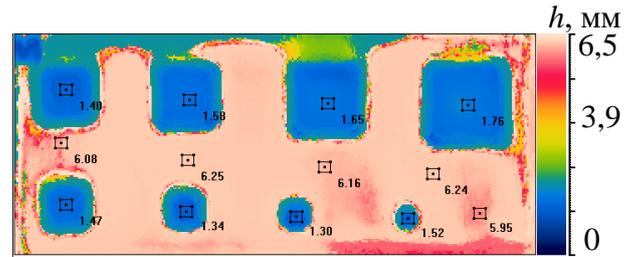
в) образец №6 ($h = 1,0$ мм)



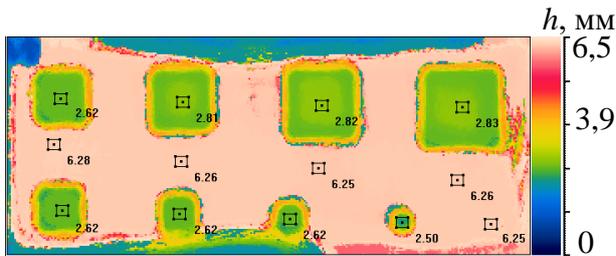
г) образец №7 ($h = 3,6$ мм)



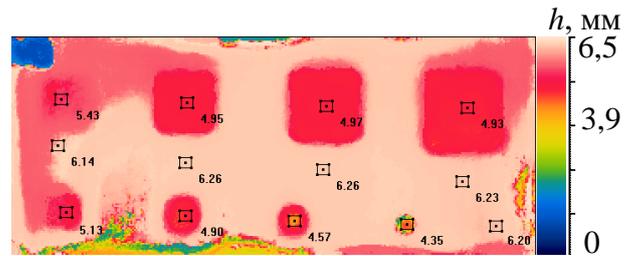
д) образец №8 ($h = 5,7$ мм)



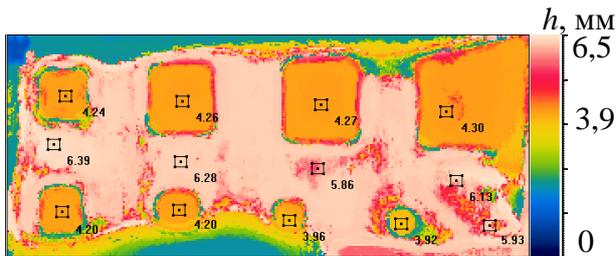
е) образец №9 ($h = 1,5$ мм)



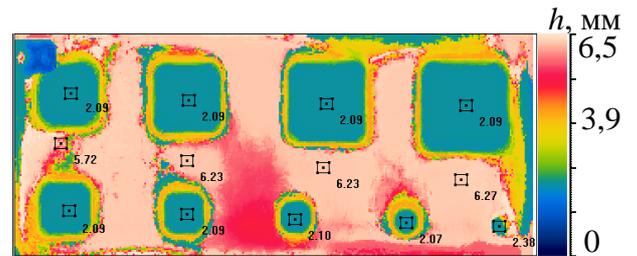
ж) образец №10 ($h = 2,6$ мм)



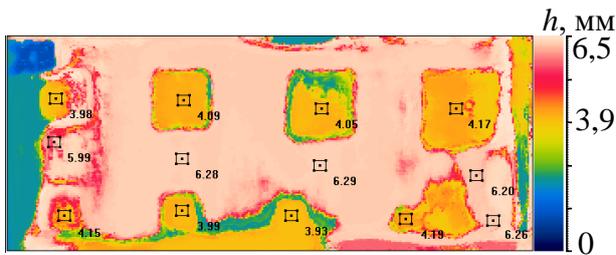
з) образец №11 ($h = 4,7$ мм)



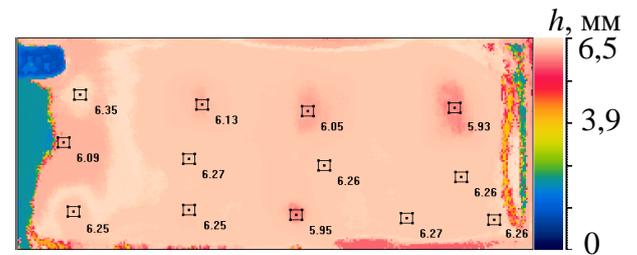
и) образец №12 ($h = 4,2$ мм)



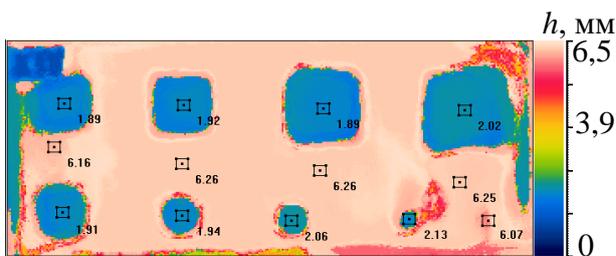
к) образец №13 ($h = 2,1$ мм)



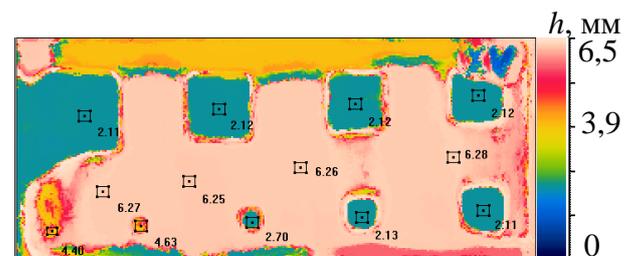
л) образец №14 ($h = 4,0$ мм)



м) образец №15 ($h = 6,1$ мм)



н) образец №16 ($h = 1,9$ мм)



о) образец №17 ($h = 2,1$ мм)

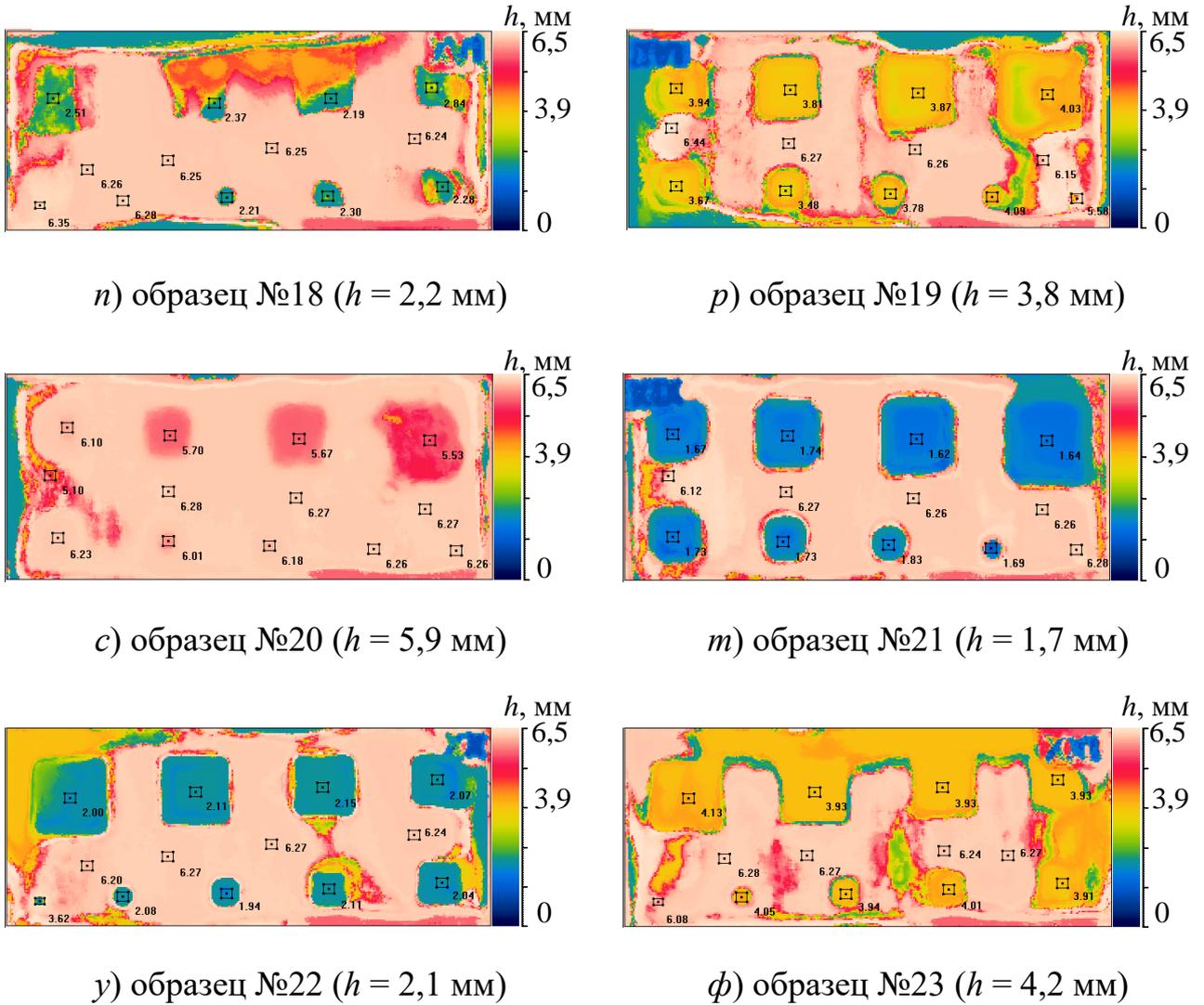


Рисунок 4.11 – Карты глубин дефектов, полученные с помощью ИНС контрольных образцов №4 – №23

В таблице 4.5 приведены расчетные значения глубин h_c залегания дефектов контрольных образцов №4 – №23 (усредненные по квадратным зонам, показанным на рисунке 4.10 а), а также средние значения h_{avr} глубин, на основании которых по (4.6) была рассчитана относительная погрешность определения глубины ε_r (%) для каждого из контрольных образцов.

$$\varepsilon_r = (h_{avr} - h_t) / h_{avr}, \quad (4.6)$$

где h_t – истинное значение глубины залегания дефектов.

Численные значения h_e глубин залегания дефектов Д1 (для контрольных образцов №4 – №23) с поперечными размерами 5×5 мм не были учтены при оценке погрешности определения глубины ε_r (%) и приведены для сравнения с глубинами залегания остальных дефектов. Как было отмечено выше, под минимальными поперечными размерами эксплуатационных дефектов ПКМ (в частности, ударных повреждений) авиационной техники, как правило, принимают дефекты размером 10×10 мм. Из приведенных данных видно, что максимальное значение относительной погрешности определения глубины ε_r дефектов составляет 8 %, что является хорошим результатом, дающим оптимистичные прогнозы на практическое применение разработанного алгоритма с целью автоматизированной обработки результатов контроля крупногабаритных объектов авиационной и космической техники.

Таблица 4.5 – Численные значения h_e глубин залегания дефектов Д1-Д9, полученные на основании карт глубин контрольных образцов №4 – №23

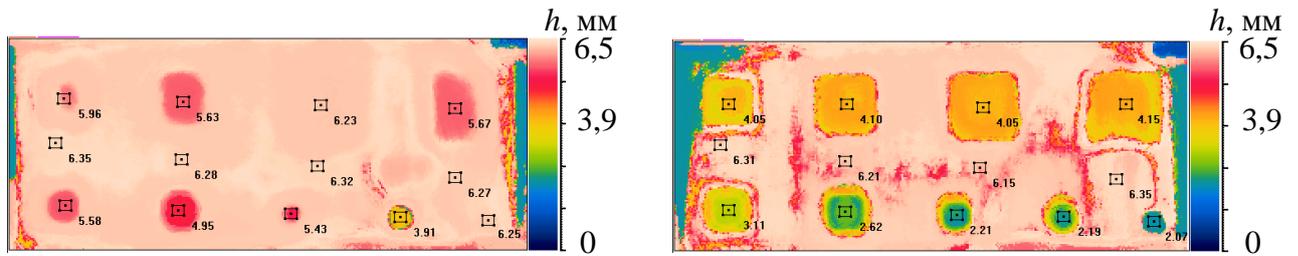
№ образца	Номер дефекта									h_{avr} , мм	ε_r , %
	Д9	Д8	Д7	Д6	Д5	Д4	Д3	Д2	Д1*		
	h_e , мм										
№4	3,43	3,07	3,10	3,19	3,06	3,01	3,26	3,38	5,84	3,19	3
№5	5,15	5,15	5,49	5,58	5,59	5,05	5,06	5,46	6,17	5,32	2
№6	1,02	1,04	1,04	1,05	1,01	0,99	1,04	1,19	5,53	1,05	5
№7	3,94	3,93	3,93	3,93	3,84	3,79	3,91	3,93	5,78	3,90	8
№8	5,61	5,50	5,57	5,64	5,61	5,54	5,49	5,36	6,04	5,54	3
№9	1,76	1,65	1,58	1,40	1,47	1,34	1,30	0,152	5,95	1,50	2
№10	2,83	2,82	2,81	2,62	2,62	2,62	2,62	2,50	6,25	2,68	3
№11	4,93	4,97	4,95	5,43	5,13	4,90	4,57	4,35	6,20	4,90	4
№12	4,30	4,27	4,26	4,24	4,20	4,20	3,96	3,92	5,93	4,17	1
№13	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,10	2,10	2,38	2,09	0
№14	4,17	4,05	4,09	3,98	4,15	3,99	3,93	4,19	6,25	4,07	2
№15	5,93	6,05	6,13	6,35	6,25	6,25	5,95	6,27	6,26	6,15	1

№16	2,02	1,89	1,92	1,89	1,91	1,94	2,06	2,13	6,07	1,97	4
№17	2,11	2,12	2,12	2,12	2,11	2,13	2,70	4,63*	4,40	2,20	5
№18	2,51	2,37	2,19	2,84	2,28	2,30	2,21	6,28*	6,35	2,39	8
№19	4,03	3,87	3,81	3,94	3,67	3,48	3,78	4,09	5,58	3,83	1
№20	5,53	5,67	5,70	6,10	6,23	6,01	6,18	6,26	6,26	5,96	1
№21	1,64	1,62	1,74	1,67	1,73	1,73	1,83	1,69	6,28	1,71	0
№22	2,00	2,11	2,15	2,07	2,04	2,11	1,94	2,08	3,62	2,06	2
№23	4,13	3,93	3,93	3,93	3,91	4,01	3,94	4,05	6,08	3,98	5

*Величины глубин залегания дефектов Д1 для всех контрольных образцов и Д2 для образцов №17 и №18 не участвовали в определении среднего значения h_{avr} и расчетах погрешности определения глубины ε_f залегания дефектов

Приведенные в таблице 4.5 данные продемонстрировали удовлетворительное качество обучения ИНС, содержащей информацию о 180-ти дефектах и вариациях бездефектных областей, что эквивалентно более 70 млн. температурных значений. Однако с практической точки зрения, наиболее интересным является применение обученного алгоритма к температурным данным контрольных образцов №1 и №2, которые не участвовали в обучении ИНС, но содержали «известную» для сети температурную информацию.

На рисунке 4.12 приведены карты глубин залегания дефектов контрольных образцов №1 и №2, а в таблице 4.6 приведены соответствующие численные значения расчетных глубин h_e залегания дефектов, истинных глубин h_t , а также величины относительной погрешности ε_f дефектометрии.



а) карта глубин контрольного образца №1

б) карта глубин контрольного образца №2

Рисунок 4.12 – Результаты дефектометрии контрольных образцов №1 и №2

Таблица 4.6 – Результаты дефектометрии контрольных образцов №1 и №2, полученные с помощью ИНС, обученной на экспериментальных данных контрольных образцов №4 – №23

№ образца	Параметр дефекта	Номер дефекта								
		Д9	Д8	Д7	Д6	Д5	Д4	Д3	Д2	Д1
№1	h_t , мм	6,1	6,1	5,9	5,9	5,7	5,2	4,7	4,2	4,2
	h_c , мм	5,67	6,23	5,63	5,96	5,58	4,95	5,43	3,91	6,25
	ε_t , %	7	2	5	1	2	5	16	7	49
№2	h_t , мм	4,0	4,0	3,8	3,8	3,6	3,1	2,6	2,1	2,1
	h_c , мм	4,15	4,05	4,1	4,05	3,11	2,62	2,21	2,19	2,07
	ε_t , %	4	1	8	7	14	15	15	4	1

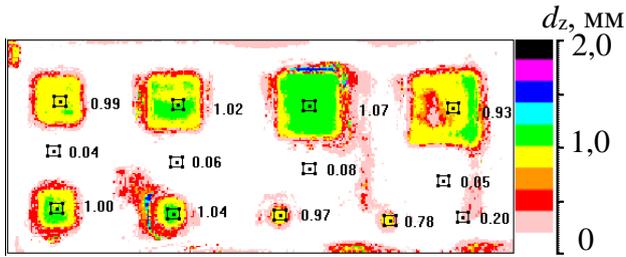
Приведенные в таблице 4.6 результаты демонстрируют низкий процент относительной погрешности ε_t даже для дефектов, расположенных на глубине 6,1 мм, а именно, 7 % и 2 % для дефектов Д9 и Д8 в образце №1. Наибольшая величина относительной погрешности ε_t определения глубины залегания дефектов достигает 16 % (за исключением 49 % для Д1 с поперечными размерами 5×5 мм, что, вероятно, связано с температурными шумами) для дефекта Д3 контрольного образца №1, который расположен на глубине 4,2 мм и имеет поперечные размеры 15×15 мм. В контрольном образце №2 максимальная величина относительной погрешности дефектометрии достигает 15 %, что для ТНК является хорошим

показателем, подтверждающим эффективность использования обученной ИНС для автоматизированной обработки результатов, а также демонстрирующим потенциал алгоритмов на базе ИНС для практического применения.

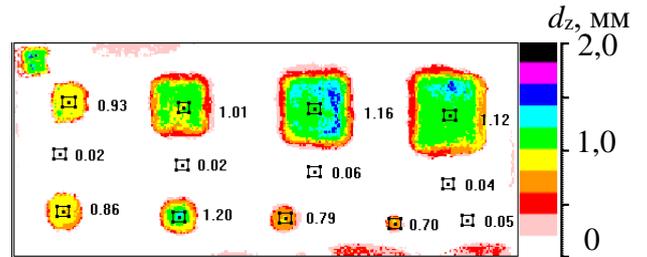
4.2.1 Применение алгоритма на базе ИНС для автоматизированного определения толщины дефектов

Несмотря на то, что на практике основными параметрами дефектов, по которым проводят отбраковку материалов и изделий, является площадь дефектной отметки, а в ряде случаев и глубина залегания дефектов (особенно, если речь идет о контроле многослойных теплозащитных покрытий), то определение толщины дефектов несет дополнительную информацию о состоянии объекта контроля. Следует отметить, что с теплофизической точки зрения, определение толщины дефектов является сложной задачей и часто характеризуется высокой погрешностью, поскольку представляет решение обратной задачи теплопроводности с нечетко определенными данными, например, по сравнению с глубиной дефектов.

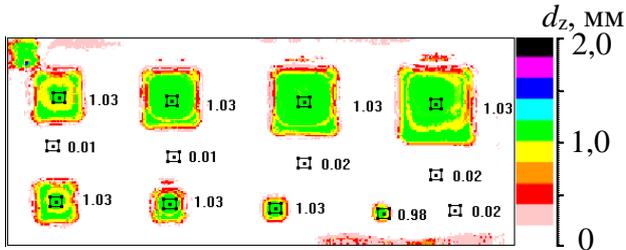
Ниже приведены результаты использования ИНС, обученной на экспериментальных данных контрольных образцов №4 – №23, для автоматизированного определения толщины дефектов в контрольных образцах №1 и №2. Для этого была обучена вторая ИНС с идентичными параметрами той ИНС, которая была использована для определения глубины залегания дефектов (описание параметров ИНС приведено в разделе 4.1.1). Карты толщин дефектов контрольных образцов №4 – №23 приведены на рисунке 4.13, а численные значения дефектометрии приведены в таблице 4.6. Следует заметить, что для обучения ИНС и проверки ее работоспособности были использованы те же экспериментально полученные последовательности термограмм, что и при оценке глубин залегания дефектов.



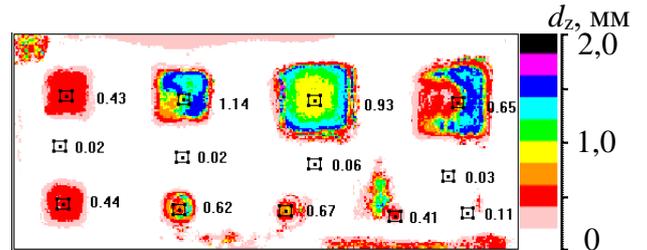
а) образец №4 ($d_z = 1$ мм)



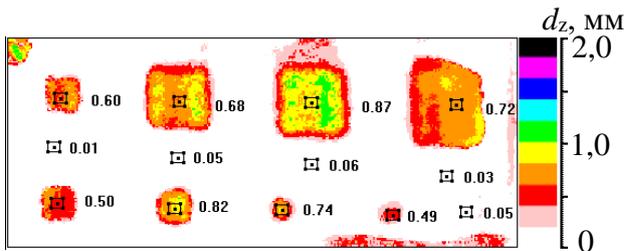
б) образец №5 ($d_z = 1$ мм)



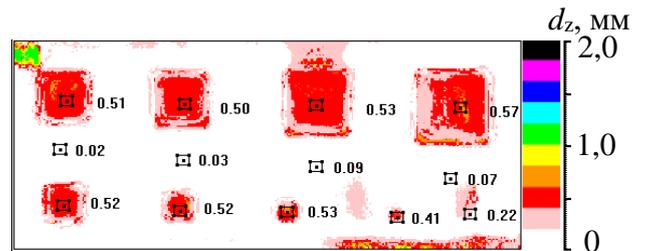
в) образец №6 ($d_z = 1$ мм)



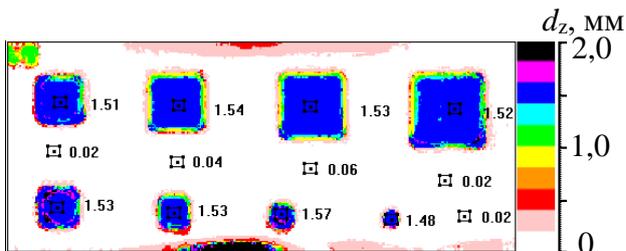
г) образец №7 ($d_z = 0,5$ мм)



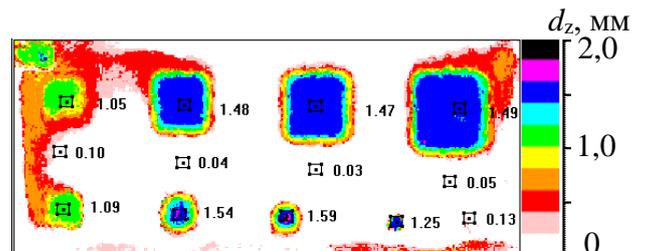
д) образец №8 ($d_z = 0,5$ мм)



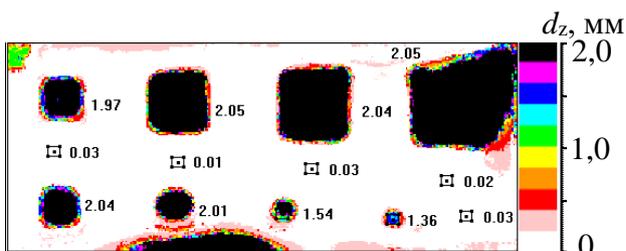
е) образец №9 ($d_z = 0,5$ мм)



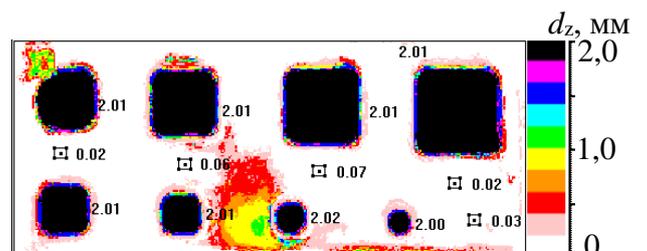
ж) образец №10 ($d_z = 1,5$ мм)



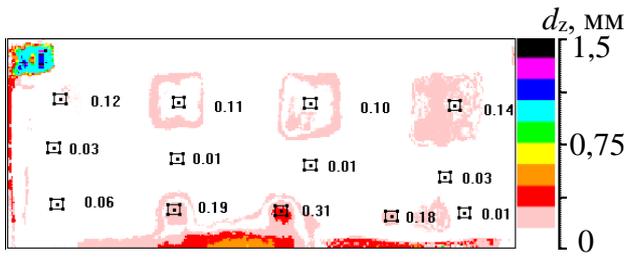
з) образец №11 ($d_z = 1,5$ мм)



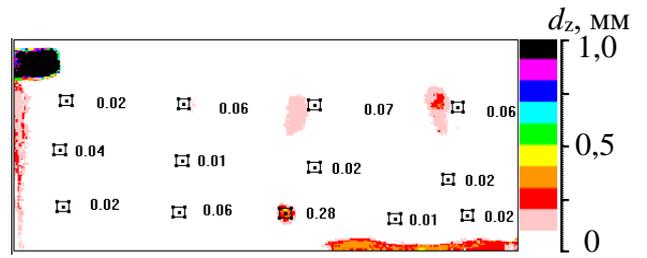
и) образец №12 ($d_z = 2$ мм)



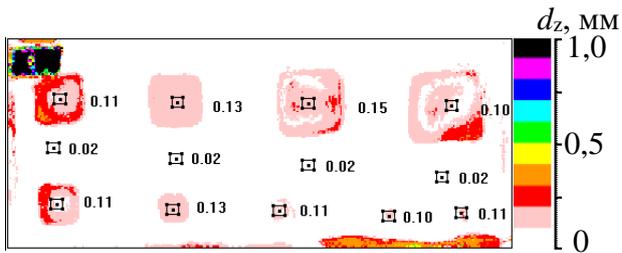
к) образец №13 ($d_z = 2$ мм)



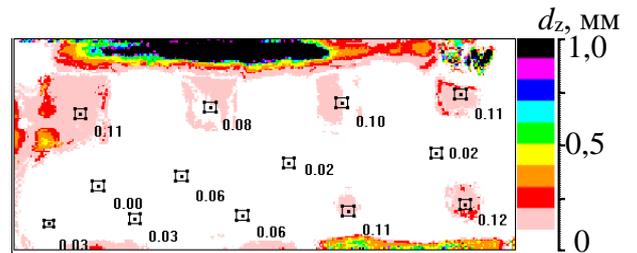
л) образец №14 ($d_z = 0,1$ мм)



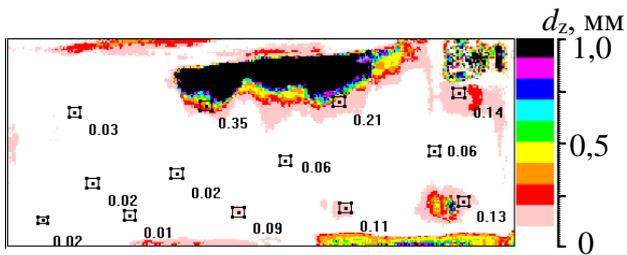
м) образец №15 ($d_z = 0,1$ мм)



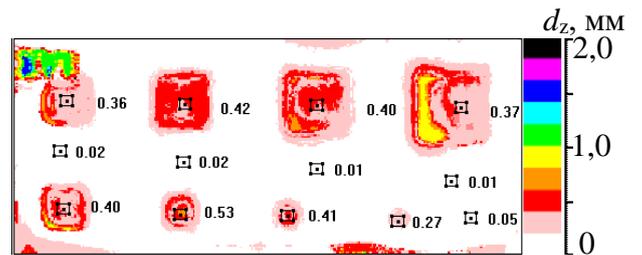
н) образец №16 ($d_z = 0,1$ мм)



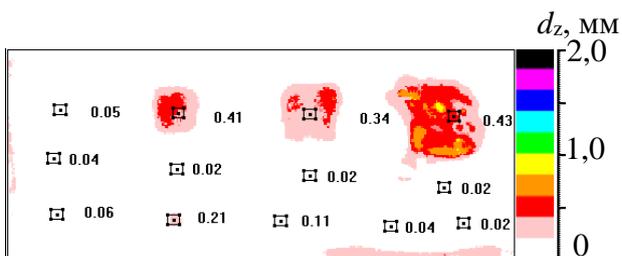
о) образец №17 ($d_z = 0,1$ мм)



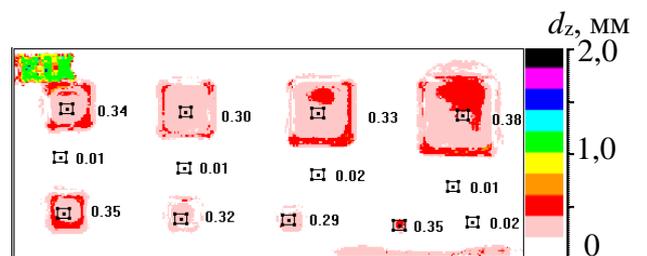
п) образец №18 ($d_z = 0,1$ мм)



р) образец №19 ($d_z = 0,3$ мм)



с) образец №20 ($d_z = 0,3$ мм)



т) образец №21 ($d_z = 0,1$ мм)

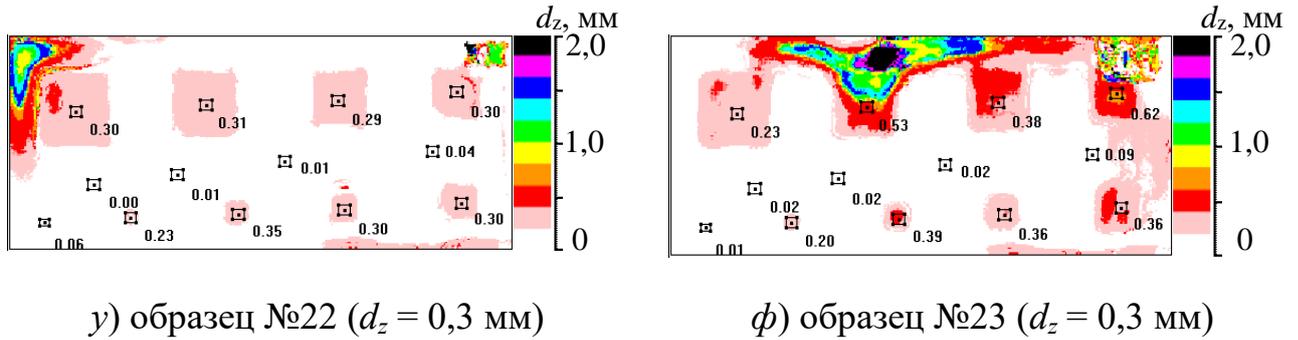


Рисунок 4.13 – Карты толщин дефектов контрольных образцов №4 – №23, полученные с помощью ИНС

Из данных таблицы 4.7 видно, что величина относительной погрешности ε_r для дефектов толщиной 1; 1,5 и 2 мм не превышает 9 %, что является удовлетворительным результатом для ТНК. Для более тонких дефектов, а именно, толщиной от 0,1 до 0,5 мм, величина ε_r варьируется от 1 до 51 %. Следует отметить, что величина ε_r для образца Д21 составляет 258 %, однако разброс $S_{откл}$ анализируемой величины для данного дефекта не превышает 0,03 мм (среднеквадратическое отклонение толщины дефектов всего набора образцов варьируется от 0,01 до 0,27 мм), что свидетельствует о хорошем уровне обучения ИНС и удовлетворительной подготовке входных данных.

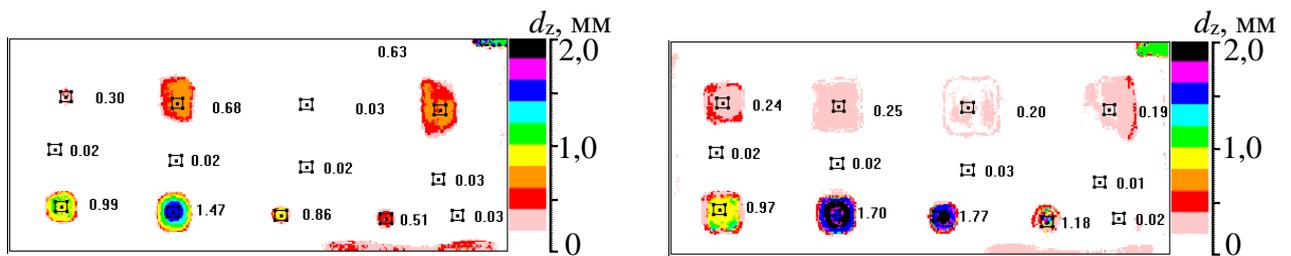
Таблица 4.7 – Результаты автоматизированного определения толщины дефектов, контрольных образцов №4 – №23, полученные с помощью ИНС

№ образца	Номер дефекта									l_{avr} , мм	$S_{откл}$	l_{true} , мм	ε_r , %
	Д9	Д8	Д7	Д6	Д5	Д4	Д3	Д2	Д1				
	h_e , мм												
№4	0,93	1,07	1,02	0,99	1,00	1,04	0,97	0,78	0,20	0,98	±0,09	1,0	3
№5	1,12	1,16	1,01	0,93	0,86	1,20	0,79	0,70	0,05	0,97	±0,18	1,0	3
№6	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	0,98	0,02	1,02	±0,02	1,0	2
№7	0,65	0,93	1,14	0,43	0,44	0,62	0,67	0,41	0,11	0,66	±0,26	0,5	32
№8	0,72	0,87	0,68	0,60	0,50	0,82	0,74	0,49	0,05	0,68	±0,14	0,5	36
№9	0,57	0,53	0,50	0,51	0,52	0,52	0,53	0,41	0,22	0,51	±0,05	0,5	2

Продолжение таблицы 4.7													
№10	1,52	1,53	1,54	1,51	1,53	1,53	1,57	1,48	0,02	1,53	±0,03	1,5	2
№11	1,49	1,47	1,48	1,05	1,09	1,54	1,59	1,25	0,13	1,37	±0,21	1,5	9
№12	2,05	2,04	2,05	1,97	2,04	2,01	1,54	1,36	0,03	1,88	±0,27	2,0	6
№13	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00	2,01	2,02	2,00	0,03	2,01	±0,01	2,0	0
№14	0,14	0,10	0,11	0,12	0,06	0,19	0,31	0,18	0,01	0,15	±0,08	0,1	51
№15	0,06	0,07	0,06	0,02	0,02	0,06	0,28	0,01	0,02	0,07	±0,09	0,1	28
№16	0,10	0,15	0,13	0,11	0,11	0,13	0,11	0,10	0,11	0,12	±0,02	0,1	18
№17	0,11	0,08	0,10	0,11	0,12	0,11	0,06	0,03	0,03	0,09	±0,03	0,1	10
№18	0,03	0,35	0,21	0,14	0,13	0,11	0,09	0,01	0,02	0,13	±0,11	0,1	34
№19	0,37	0,40	0,42	0,36	0,40	0,53	0,41	0,27	0,05	0,40	±0,07	0,3	32
№20	0,43	0,34	0,41	0,05	0,06	0,21	0,11	0,04	0,02	0,21	±0,17	0,3	31
№21	0,38	0,33	0,30	0,34	0,35	0,32	0,29	0,35	0,02	0,33	±0,03	0,1	232*
№22	0,30	0,31	0,29	0,30	0,30	0,30	0,35	0,23	0,06	0,30	±0,03	0,3	1
№23	0,23	0,53	0,38	0,62	0,36	0,36	0,39	0,20	0,01	0,38	±0,14	0,3	28

* «Выпавшее» значение, вызванное некорректным указанием цели при обучении ИНС

На рисунке 4.14 приведены результаты автоматизированного определения толщины дефектов контрольных образцов №1 и №2, температурные данные которых не участвовали в обучении ИНС.



а) карта дефектов контрольного образца №1

б) карта дефектов контрольного образца №2

Рисунок 4.14 – Результаты автоматизированного определения толщины дефектов, полученные с помощью ИНС

Как и в случае с определением глубины залегания дефектов, результаты дефектометрии (см. таблицу 4.8) по толщине для контрольного образца №1

характеризуются большей погрешностью ε_i , а именно, находятся в диапазоне от 0 до 127 % (за исключением выпавшего значения 530 % для Д9). Для контрольного образца №2 наибольшая погрешность определения толщины дефектов составляет 100 % (для дефекта Д8 толщиной 0,1 мм), а наименьшая - составляет 17 % (для дефекта Д7 толщиной 0,3 мм).

Таблица 4.8 – Результаты автоматизированного определения толщины дефектов контрольных образцов №1 и №2, полученные с помощью ИНС, обученной на данных контрольных образцов №4 – №23

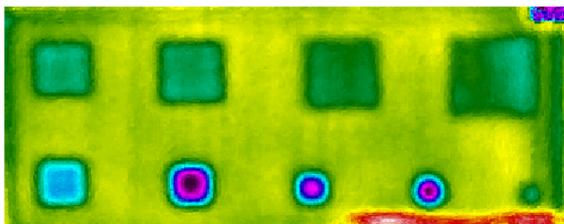
Номер образца	Параметр дефекта	Номер дефекта								
		Д9	Д8	Д7	Д6	Д5	Д4	Д3	Д2	Д1
	l_t , мм	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,0
№1	l_e , мм	0,63	0,03	0,68	0,3	0,99	1,47	0,86	0,51	0,03
	ε_i , %	530*	70	127	0	98	47	43	75	99
№2	l_e , мм	0,19	0,20	0,25	0,24	0,97	1,70	1,77	1,18	0,02
	ε_i , %	90	100	17	20	94	70	18	41	99

* «Выпавшее» значение, связанное с существенными температурными шумами.

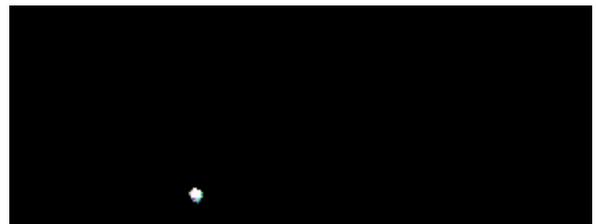
4.3 Тепловая томография как инструмент автоматизированной дефектометрии

Фактически, автоматизации подлежит последовательное применение любых программных алгоритмов обработки данных, если речь идет о контроле однотипных объектов в идентичных условиях. Одним из эффективных алгоритмов обработки данных является метод динамической тепловой томографии, предложенный в ТПУ (г. Томск) [4, 100, 163]. Эффективность данного метода при обработке результатов ГНК контрольного образца №2, была оценена в сравнении с результатами дефектометрии, полученными с помощью ИНС, описанными выше.

В частности, на рисунке 4.15 приведены результаты обработки последовательности термограмм контрольного образца №2 методом динамической тепловой томографии. Фактически, алгоритм тепловой томографии позволяет преобразовать исходную последовательность термограмм, например, в последовательность таймограмм – изображений, включающих времена наступления максимумов температурных сигналов τ_m . Как было отмечено выше (2.11), величина τ_m прямо пропорциональна квадрату глубины залегания дефектов h , соответственно температурные аномалии от более глубоких дефектов проявляются с определенной задержкой по времени. На рисунке 4.15 б-д приведены таймограммы контрольного образца №2, соответствующие различным «срезам» по глубине, определяемым оптимальными моментами времени τ_m проявления каждого из дефектов: Д2 – 36,6 с; Д3 – 59,7 с; Д4 – 67,2 с; Д5 – 89,7 с; Д6 – 100,2 с; Д7 – 100,1 с; Д8 – 111,3 с; Д9 – 104,8 с. Следует отметить, что приведенные ниже результаты тепловой томографии были получены из последовательности фазовых изображений, полученных методом Фурье преобразования. Калибровка значений фаз в соответствии с глубиной дефектов была проведена с помощью результатов моделирования процедуры ТНК образца с идентичными параметрами.



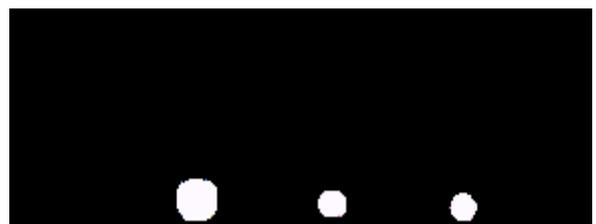
а) изображение фаз, 2-я гармоника, преобразование Фурье



б) фазовая томограмма, срез по глубине в диапазоне 2,0 – 2,0 мм



в) фазовая томограмма, срез по глубине в диапазоне 2,1 – 2,3 мм



г) фазовая томограмма, срез по глубине в диапазоне 2,1 – 2,6 мм



д) фазовая томограмма, срез по глубине в диапазоне 2,2 – 3,1 мм



е) фазовая томограмма, срез по глубине в диапазоне 2,2 – 4,0 мм



ж) фазовая томограмма, срез по глубине в диапазоне 2,3 – 4,1 мм



з) фазовая томограмма, срез по глубине в диапазоне 2,4 – 5,0 мм

Рисунок 4.15 – Результаты динамической тепловой томографии контрольного образца №2

В случае использования метода тепловой томографии с целью определения глубины залегания дефектов, на результаты может существенно влиять выбор бездефектной зоны, усредненное значение анализируемых параметров в которой участвует в построении таймограмм. Данная особенность метода затрудняет автоматизацию процесса дефектометрии. Сравнивая результаты определения глубины залегания скрытых дефектов, полученные методом тепловой томографии с результатами дефектометрии, полученные с помощью ИНС, можно сделать вывод, что оба метода продемонстрировали удовлетворительные результаты и позволяют получить достаточную информацию для оценки степени дефектности изделия.

4.4 Выводы по Главе 4

Разработанная методика автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии, основанная на использовании алгоритмов на базе ИНС и реализованная в программном модуле Thermo_NN (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020619186), продемонстрировала эффективность определения глубины залегания дефектов и их толщины в контрольных образцах многослойных структур №1 и №2, если сеть обучена на экспериментальных данных, полученных на наборе контрольных образцов №4 – №23.

В частности, полученные результаты показали снижение относительной погрешности определения глубины залегания дефектов для расслоений, расположенных на глубинах до 6,1 мм, а именно, 7 % и 2 % для дефектов Д9 и Д8 в контрольном образце №1. Наибольшая величина относительной погрешности составляла 16 % для дефекта Д3 контрольного образца №1, который был расположен на глубине 4,2 мм и имел поперечные размеры 15×15 мм. В контрольном образце №2 максимальная величина относительной погрешности дефектометрии составляла 15 %, что для активного ТНК является приемлемым показателем, подтверждающим эффективность использования ИНС для автоматизированной обработки результатов контроля.

Автоматизированное определение толщины скрытых дефектов контрольных образцов №1 и №2 продемонстрировало величину погрешности в диапазоне от 0 до 127 %. Таким образом, средняя величина погрешности определения 17-ти дефектов в двух контрольных образцах №1 и №2 не превысила 65 %, что является приемлемым результатом для ТНК.

С точки зрения определения поперечных размеров дефектов и их площади, близкие к истинным результаты автоматизированной дефектометрии продемонстрировала ИНС, обученная на результатах моделирования. В частности, для контрольного образца №3 при дефектометрии с помощью ИНС, обученной на результатах аналитического моделирования, погрешность определения площади дефектов в среднем не превышала 8 %, в то время как при обучении ИНС на

экспериментальных данных погрешность не превышала 26 %. Такие результаты, с практической точки зрения, и учитывая автоматизированный характер их получения, является допустимым для большинства задач ТНК.

Анализируя возможности автоматизации процедуры дефектометрии, было установлено, что использование альтернативных методов обработки данных, например, метода тепловой томографии, по сравнению с использованием алгоритмов на базе ИНС, имеет ряд недостатков, а именно: 1) необходимость выбора эталонной точки, расположение которой может существенно искажать результаты оценки параметров обнаружения дефектов; 2) невозможность использования традиционных алгоритмов для автоматизированной дефектометрии результатов ТНК, полученных методом сплошного сканирования из-за особенностей данного метода. Таким образом, использование ИНС в ТНК предоставляет существенные возможности для автоматизации процедуры обработки данных и является перспективным для решения практических задач НК.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДИК ТНК МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ ПРОЗРАЧНОСТЬЮ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ШУМОВ

Как было отмечено ранее, на практике в большинстве случаев применяют классическую одностороннюю процедуру ТНК, особенно, если речь идет о неразрушающих испытаниях эксплуатируемой техники, например, элементов фюзеляжа или крыльев самолета [164-166]. Повысить результативность классической односторонней процедуры ТНК (с точки зрения дефектоскопии, двухсторонняя процедура ТНК является более эффективной) можно используя нагреватели бóльшей мощности, либо реализовав ТНК способом тепловизионного сканирования (линейный нагреватель, расположенный вблизи контролируемой поверхности, создает более мощный тепловой поток без тепловых помех тепловизору и обладает меньшими массой и габаритами [167 - 174]). В любом случае, ПКМ, а также различного рода покрытия, характеризуются температурой деструкции (для некоторых ПКМ она составляет $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$), что ограничивает увеличение мощности нагрева как при классическом, так и при сканирующем ТНК. Кроме этого, увеличение мощности нагрева связано с увеличением габаритных размеров и массы источников тепловой стимуляции, что имеет значение при разработке тепловых дефектоскопов. Ввиду перечисленных ограничений, связанных с особенностями контролируемого материала и массогабаритными характеристиками источников нагрева, существует необходимость разработки новых способов одностороннего ТНК. Как было отмечено в Главе 3, ТНК способом тепловизионного сканирования имеет существенный потенциал для дальнейшей разработки и зачастую позволяет более достоверно выявлять дефекты, чем при использовании классической процедуры ТНК.

Поскольку, с точки зрения теории теплопроводности, нагрев и охлаждение являются эквивалентными процессами, ранее были предложены идеи по применению в ТНК вместо импульсов нагрева импульсы охлаждения, например, с

помощью жидкого азота или охлажденного воздуха [175-177]. В рамках настоящей диссертационной работы был предложен способ комбинирования двух процессов нагрева и охлаждения, что позволяет снизить тепловую нагрузку на материал и повысить контрастный сигнал над дефектом в тот момент времени, когда избыточная температура бездефектной области приближается к нулю. Следует отметить, что в последние годы опубликованы научные работы, в которых при ТНК реализован и нагрев, и охлаждение контролируемой поверхности, в том числе, при их чередующихся циклах [178]. В работе [179], опубликованной в период выполнения настоящей диссертационной работы, описано проведение ТНК способом сканирования с применением импульсов нагрева и охлаждения, однако авторами предложено использование эквивалентных по мощности импульсов нагрева и охлаждения с целью «раскачивания» тепловых процессов в объекте контроля и анализа эффективности выявления дефектов, расположенных на различной глубине.

Ниже описаны результаты теоретических и экспериментальных исследований предложенного способа, который технически заключается в последовательной реализации линейного нагрева и линейного принудительного охлаждения, осуществляемого в определенный момент времени после окончания нагрева, и фактически представляет собой модификацию способа тепловизионного сканирования. Методика проведения ТНК предложенным способом приведена в Приложении В. На устройство, реализующее предложенный способ ТНК, подана заявка на патент РФ №2024137869 «Сканирующий тепловой дефектоскоп».

5.1 Комбинирование нагрева и принудительного охлаждения в ТНК: численное моделирование трехмерных задач контроля

Данный раздел адаптирован из [76, 180]. В настоящем разделе приведены результаты численного моделирования (использован разработанный программный модуль ThermoCalc_HC [181]) классической односторонней процедуры ТНК пластин из ПКМ с внутренними дефектами при комбинации импульсов нагрева и

принудительного охлаждения. Основной целью моделирования являлась оценка эффективности настоящего способа ТНК, а также определение оптимального момента времени для применения импульса принудительного охлаждения.

В моделях односторонней классической процедуры ТНК была исследована углепластиковая пластина размерами $400 \times 125 \times 10$ мм (рисунок 5.1) с выраженной анизотропией, содержащая 4 искусственных дефекта Д1-Д4 в виде расслоений, заполненных воздухом (толщиной $d_z = 0,08$; $0,06$; $0,04$; и $0,02$ мм), расположенных на глубине $h = 1,5$ мм. Важно отметить, что в модель были добавлены компоненты аддитивного и мультипликативного температурного шума.

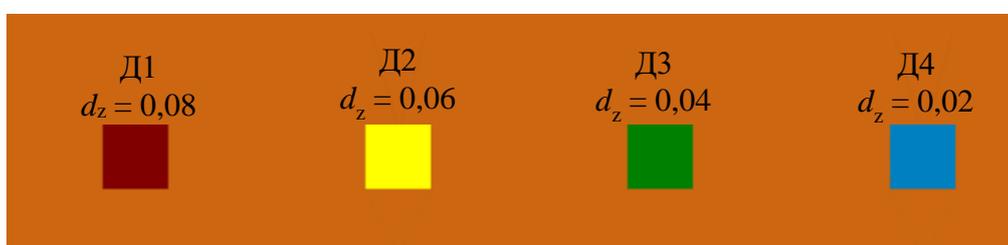
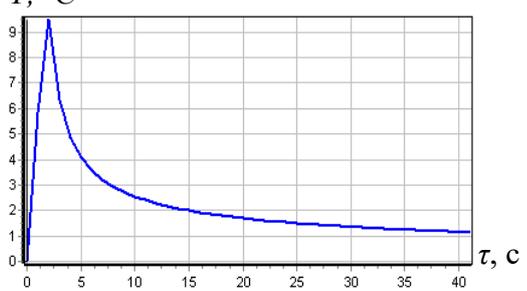
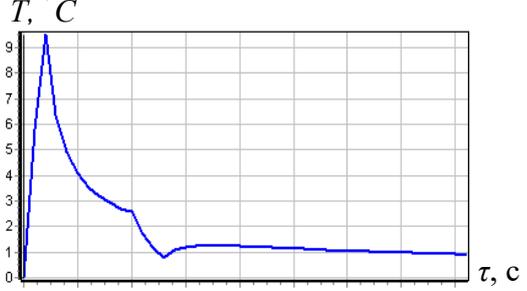
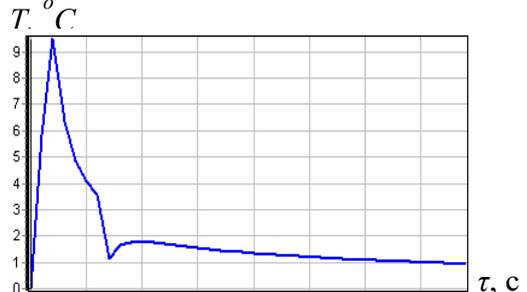


Рисунок 5.1– Модель пластины из углепластика с внутренними дефектами

Всего было рассмотрено 8 моделей одностороннего ТНК, в которых помимо основного импульса нагрева (мощность Q_h варьировалась от 10 до $13,5 \text{ кВт/м}^2$, длительность нагрева τ_h составляла 2 с) был введен импульс принудительного охлаждения (в моделях №1-5, №7 мощность Q_c варьировали от $1,16$ до 5 кВт/м^2 , длительность τ_c изменяли от 1 до 3 с, момент τ начала охлаждения соответствовал 12-й секунде после начала процедуры контроля), а также импульс дополнительного нагрева (модель №6, мощность $Q_{ha} = 3,5 \text{ кВт/м}^2$, длительность $\tau_{ha} = 1$ с). Кроме того, был рассмотрен случай предварительного охлаждения объекта контроля (модель №8, начальная температура $T_i = -3^\circ \text{C}$). В качестве реперной была выбрана модель №1, соответствующая классической односторонней процедуре ТНК. Графики изменения температуры контролируемой поверхности и соответствующее описание параметров контроля приведены в таблице 5.1.

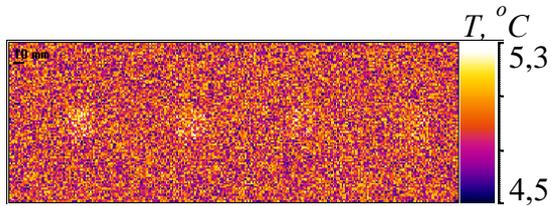
Таблица 5.1 – Результаты численного моделирования одностороннего ТНК с применением импульсов принудительного охлаждения и дополнительного нагрева

Модель	Параметры первой стимуляции	Параметры второй стимуляции	Графики T_{nd}
№1	$Q_h = 10 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_h = 2 \text{ с}$; $\tau = 0 \text{ с}$	-	 <p>$T, ^\circ C$</p> <p>$\tau, \text{ с}$</p>
№2	$Q_h = 10 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_h = 2 \text{ с}$; $\tau = 0 \text{ с}$	$Q_c = 3,5 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_c = 1 \text{ с}$; $\tau = 10 \text{ с}$	 <p>$T, ^\circ C$</p> <p>$\tau, \text{ с}$</p>
№3	$Q_h = 10 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_h = 2 \text{ с}$; $\tau = 0 \text{ с}$	$Q_c = 1,16 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_c = 3 \text{ с}$; $\tau = 10 \text{ с}$	 <p>$T, ^\circ C$</p> <p>$\tau, \text{ с}$</p>
№4	$Q_h = 10 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_h = 2 \text{ с}$; $\tau = 0 \text{ с}$	$Q_c = 3,5 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_c = 1 \text{ с}$; $\tau = 7 \text{ с}$	 <p>$T, ^\circ C$</p> <p>$\tau, \text{ с}$</p>

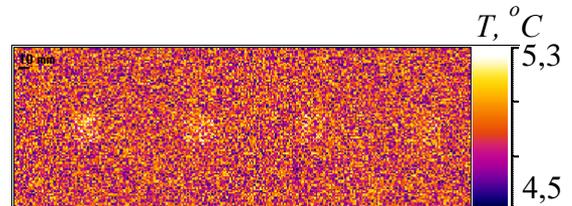
Продолжение таблицы 5.1			
№5	$Q_h = 10 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_h = 2 \text{ с}$; $\tau = 0 \text{ с}$	$Q_c = 5 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_c = 1 \text{ с}$; $\tau = 10 \text{ с}$	
№6	$Q_h = 10 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_h = 2 \text{ с}$; $\tau = 0 \text{ с}$	$Q_{ha} = 3,5 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_{ha} = 1 \text{ с}$; $\tau = 10 \text{ с}$	
№7	$Q_h = 10 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_h = 2 \text{ с}$; $\tau = 7 \text{ с}$	$Q_c = 3,5 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_c = 1 \text{ с}$; $\tau = 0 \text{ с}$	
№8	$Q_h = 13,5 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_h = 2 \text{ с}$; $\tau = 0 \text{ с}$	$T_i = -3^\circ \text{C}$	

Выбор времени начала второго импульса тепловой стимуляции (нагрева и принудительного охлаждения) был связан с моментом наступления максимума температурного τ_m сигнала ΔT над дефектом Д1, который для модели №1 составлял 10 с. Следует отметить, что для модели №4 и модели №7 импульс принудительного охлаждения был применен до момента наступления максимума температурного

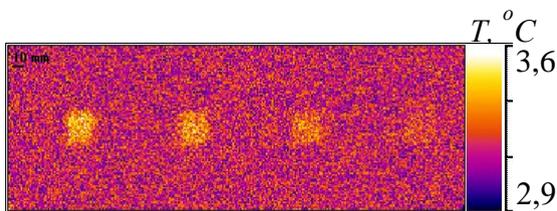
сигнала, в частности, для модели №4 - на 7-й секунде, а для модели №7 - до начала основного нагрева. На рисунке 5.2 приведены термограммы моделей №1 и №2 для различных моментов времени, а также графики изменения температурных сигналов ΔT , температурных контрастов C и отношения сигнал/шум S .



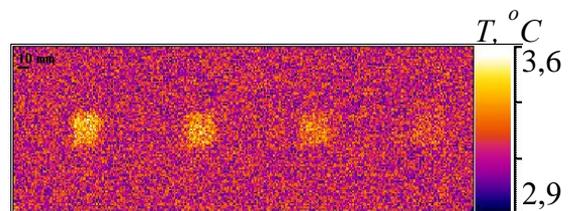
а) термограмма модели №1
(4-я секунда контроля)



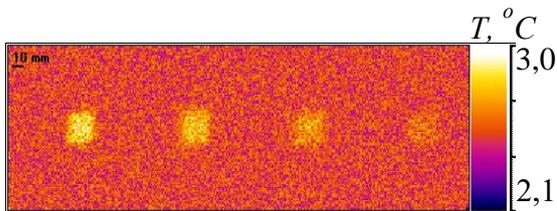
б) термограмма модели №2
(4-я секунда контроля)



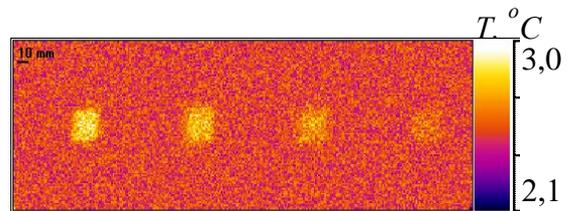
в) термограмма модели №1
(7-я секунда контроля)



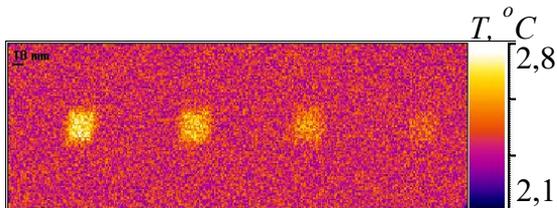
г) термограмма модели №2
(7-я секунда контроля)



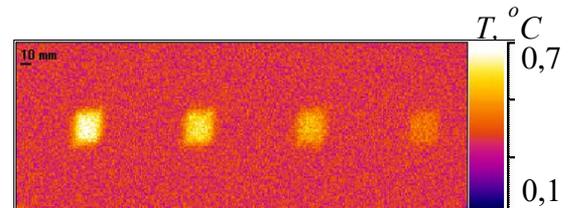
д) термограмма модели №1
(10-я секунда контроля)



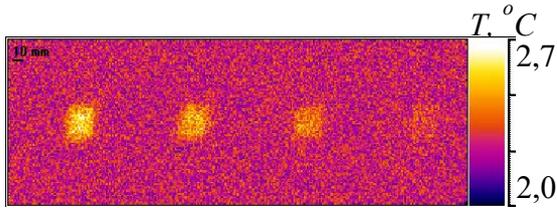
е) термограмма модели №2
(10-я секунда контроля)



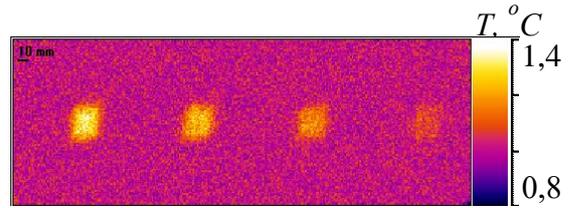
ж) термограмма модели №1
(11-я секунда контроля)



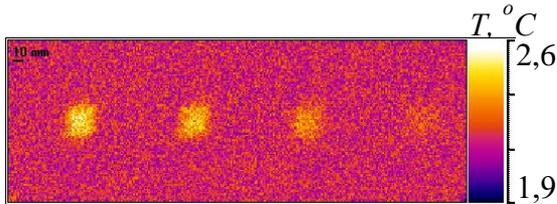
з) термограмма модели №2
(11-я секунда контроля)



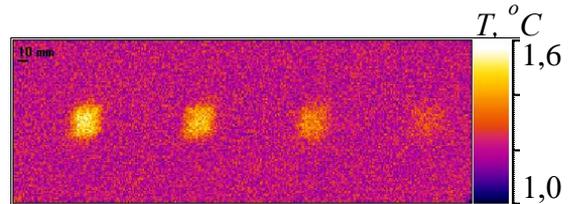
и) термограмма модели №1
(12-я секунда контроля)



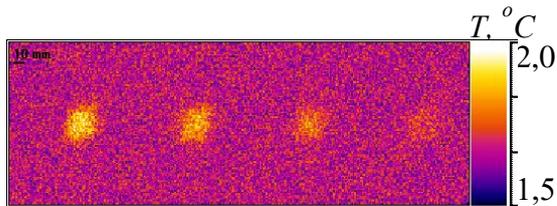
к) термограмма модели №2
(12-я секунда контроля)



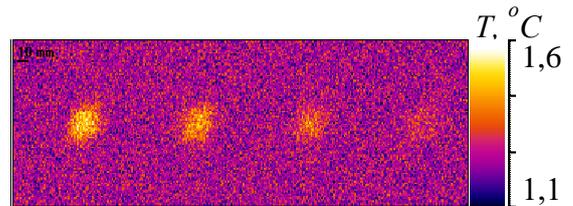
л) термограмма модели №1
(13-я секунда контроля)



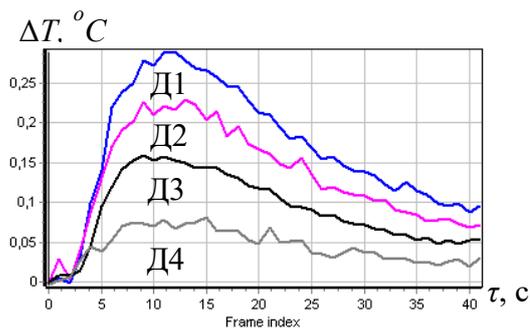
м) термограмма модели №2
(13-я секунда контроля)



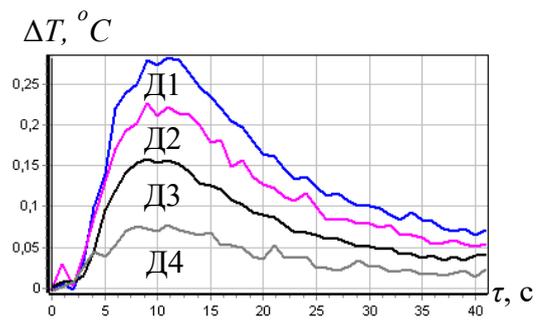
н) термограмма модели №1
(20-я секунда контроля)



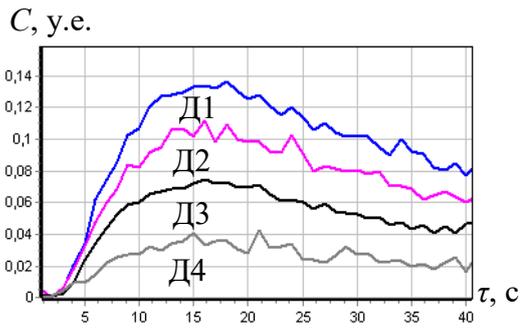
о) термограмма модели №2
(20-я секунда контроля)



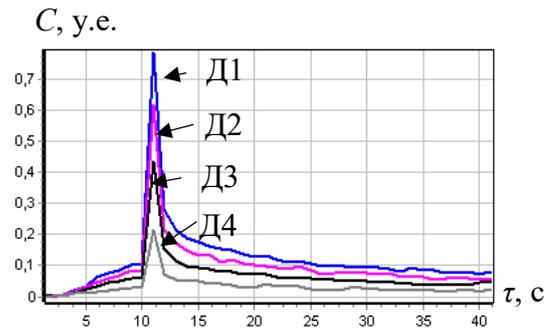
п) графики температурных сигналов ΔT дефектов Д1-Д4 для модели №1



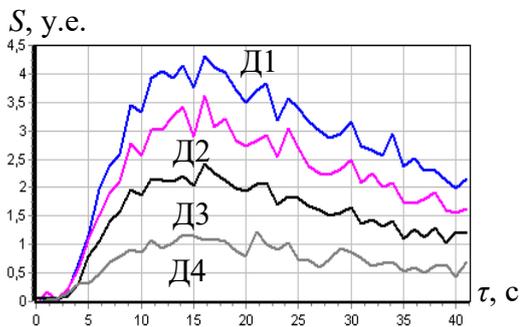
р) графики температурных сигналов ΔT дефектов Д1-Д4 для модели №2



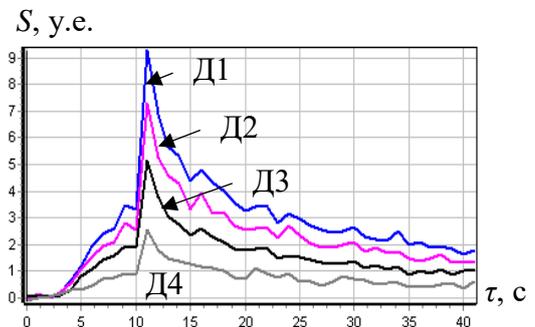
с) графики температурных контрастов C дефектов Д1-Д4 для модели №1



м) графики температурных контрастов C дефектов Д1-Д4 для модели №2



у) графики отношения сигнал/шум S дефектов Д1-Д4 для модели №1

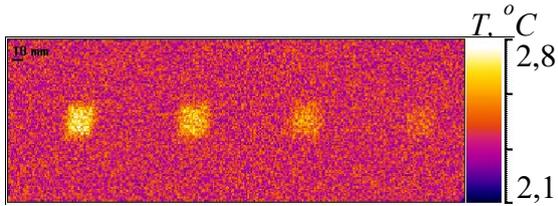


ф) графики отношения сигнал/шум S дефектов Д1-Д4 для модели №2

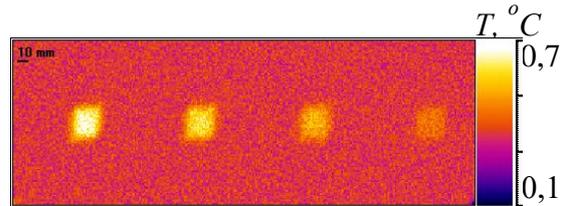
Рисунок 5.2 – Результаты численного моделирования процедур ТНК при различных импульсах нагрева и принудительного охлаждения

Как видно из графиков рисунка 5.2 *м, ф*, через 1 секунду после начала импульса принудительного охлаждения происходит резкий рост температурных контрастов C и величины отношения сигнал/шум S (в 7 и 2 раза соответственно), а на термограммах рисунка 5.2 *з, к*, соответствующих 11-й и 12-й секундам ТНК, улучшено визуальное восприятие дефектов.

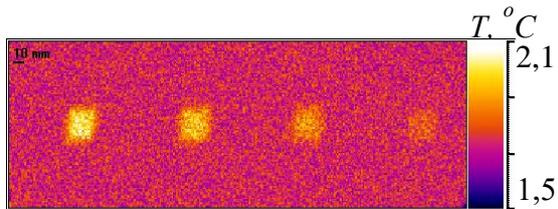
Подобным образом были проанализированы модели №3-№8, а для наглядной оценки эффективности применения принудительного охлаждения и дополнительного импульса нагрева, на рисунке 5.3 приведены термограммы моделей №1-№8 для моментов времени, в которые величины температурного контраста C и отношения сигнал/шум S для дефекта Д1 были максимальными.



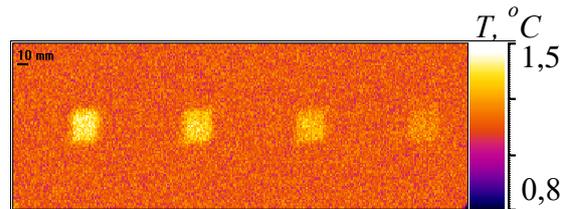
а) модель №1, 11-я секунда ТНК
($C = 0,135$; $S = 4,3$)



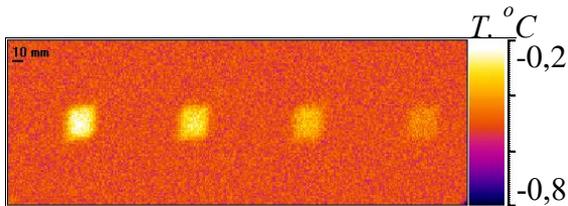
б) модель №2, 11-я секунда ТНК;
($C = 0,8$; $S = 9,1$)



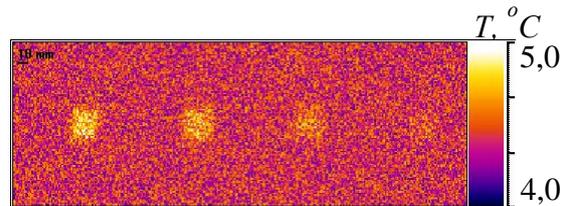
в) модель №3, 11-я секунда ТНК
($C = 0,36$; $S = 7,5$)



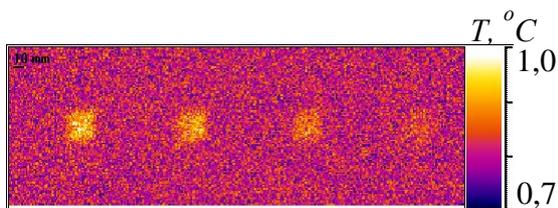
г) модель №4, 7-я секунда ТНК
($C = 0,2$; $S = 5,2$)



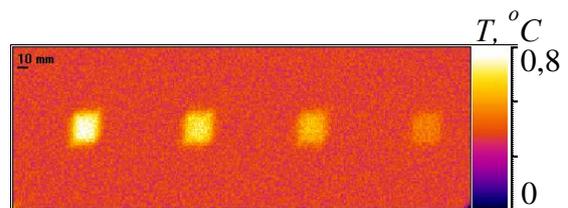
д) модель №5, 11-я секунда ТНК
($C = 0,6$; $S = 8,5$)



е) модель №6, 11-я секунда ТНК
($C = 0,125$; $S = 4$)



ж) модель №7, 18-я секунда ТНК
($C = 0,14$; $S = 2,75$)



з) модель №8, 11-я секунда ТНК
($C = 24$; $S = 14$)

Рисунок 5.3 – Термограммы моделей №1-№8

Результаты моделирования (рисунок 5.3) демонстрируют улучшение визуального распознавания скрытых дефектов при использовании импульса

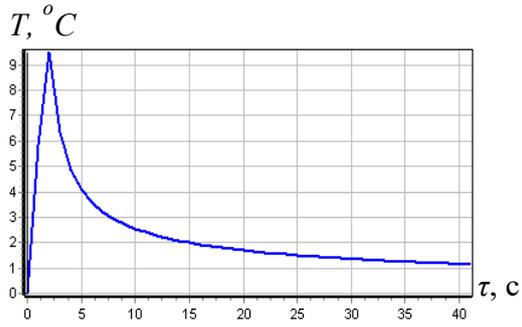
принудительного охлаждения поверхности объекта контроля на стадии его естественного остывания. Показано, что оптимальным временем применения импульса охлаждения является момент, соответствующий времени τ_m максимального температурного сигнала конкретной дефектной области. Например, в модели №2 импульс принудительного охлаждения позволил повысить величину температурного контраста C более чем в 5 раз, а уровень отношения/сигнал шум S - более чем в 2 раза по сравнению с результатами ТНК в модели №1. При этом, уровни температурного контраста C и отношения сигнал/шум S в модели №5 ниже, чем в модели №2 (в модели №5 использован импульс принудительного охлаждения большей мощности, в результате чего температура поверхности объекта контроля опускается ниже его начальной температуры). Также по результатам моделирования было установлено, что, в случае, если объект контроля имеет начальную температуру на 3 градуса ниже температуры окружающей среды, а мощность нагрева увеличена на 30 % (это было реализовано в модели №8), то уровень температурного контраста C возрастает на порядок, а уровень отношения сигнал/шум S возрастает более чем в 3 раза по сравнению с моделью №1. Такой подход фактически увеличивает диапазон применяемой мощности нагрева без превышения установленного для контролируемого материала верхнего температурного порога, однако требует предварительного охлаждения всего объекта контроля, что труднее с практической точки зрения. Следует отметить, что использование импульса для принудительного охлаждения контролируемой поверхности до начала импульса основного нагрева не дает улучшения качества контроля с точки зрения обнаружения дефектов, что подтверждают результаты анализа модели №7.

Таким образом, анализируя результаты моделирования, можно утверждать, что оптимальным моментом времени применения импульса принудительного охлаждения для обнаружения конкретного дефекта является момент его максимального температурного сигнала. Однако с практической точки зрения «попасть» в оптимальное время применения импульса охлаждения затруднительно, т.к. один объект контроля может иметь несколько дефектов с различными

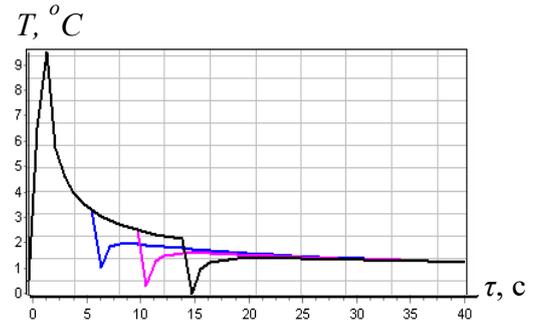
параметрами. Ввиду этого, был проведен анализ изменения среднего уровня отношения сигнал/шум S для дефектов Д1-Д4 (была использована модель пластины, показанная на рисунке 5.1) при применении импульса принудительного охлаждения в моменты времени, не оптимальные для данных дефектов согласно результатам, полученным классическим односторонним ТНК.

Для этого были рассмотрены 6 новых моделей ТНК, в которых варьировали мощность и время применения принудительного охлаждения. На рисунке 5.4 показаны графики температуры T и температурных сигналов ΔT для моделей №1 и №9-14, а также термограммы моделей №1 и №12 для оптимальных времен обнаружения дефектов. В моделях №9-11 принудительное охлаждение ($Q_c = 3,5 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$; $\tau_c = 1 \text{ с}$) применяли на 7-й, 12-й и 17-й секундах ТНК, то есть в диапазоне времени, в котором находились максимумы температурных сигналов ΔT дефектов Д1-Д4 согласно исходной модели №1 (соответствующий диапазон времени выделен голубым цветом на рисунке 5.4 з). В моделях №12 - 14 мощность импульсов принудительного охлаждения Q_c составляла 4,2; 3,15 и 2,6 $\text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ что обеспечило «приближение» текущей температуры поверхности образца к его начальной температуре (см. рисунок 5.4 в).

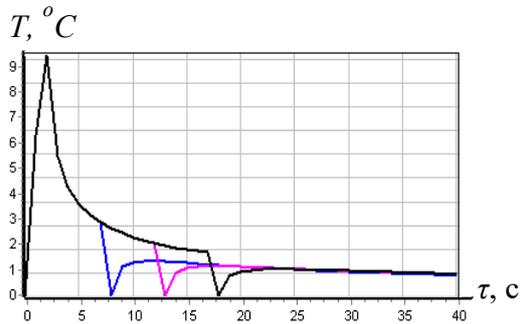
Рисунок 5.4 и таблица 5.2 (таблица содержит данные об отношении сигнал/шум S для дефектов Д1-Д4) иллюстрируют, что использование импульса принудительного охлаждения улучшает визуальное распознавание дефектов и повышает средний уровень отношения сигнал/шум S как при ранних временах ТНК, так и в диапазоне, соответствующем оптимальным временам обнаружения дефектов. При этом, наибольшие средние значения отношений сигнал/шум S соответствуют моделям №12-14, в которых мощность импульса охлаждения была подобрана таким образом, чтобы температура контролируемой поверхности не опускалась ниже ее начальной температуры. Максимальное среднее значение отношения сигнал/шум $S = 6$ продемонстрировала модель №12.



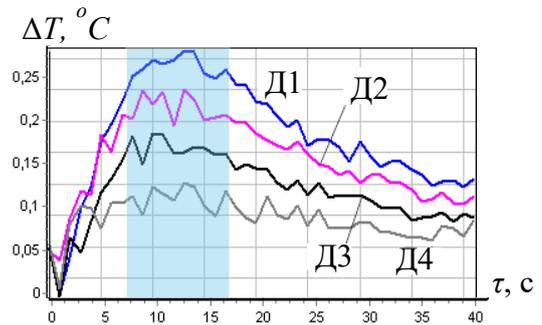
а) график температуры в бездефектной зоне (модель №1)



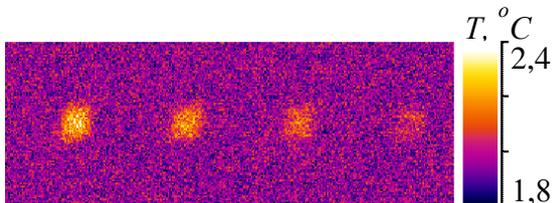
б) график температуры в бездефектной зоне (модели № 9-11)



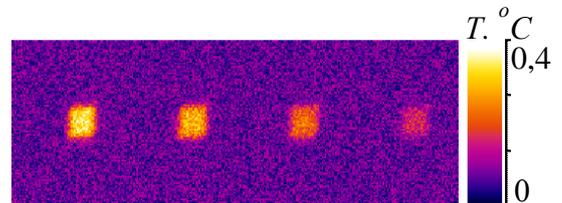
в) график температуры в бездефектной зоне (модели № 12-14)



г) графики температурных сигналов для дефектов Д1-Д4 (модели №1)



д) термограмма для 10-й секунды (модель №1, $S = 4,9$ для дефекта Д1)



е) термограмма для 8-й секунды (модель №12, $S = 8,8$ для дефекта Д1)

Рисунок 5.4 - Результаты численного моделирования ТНК с различными параметрами принудительного охлаждения

Таблица 5.2 - Результаты численного моделирования ТНК с различными режимами принудительного охлаждения

Отношение сигнал/шум S	Модель						
	№1	№9	№10	№11	№12	№13	№14
Дефект Д1	4,9	8,4	9,1	7,7	8,8	9,1	8,3
Дефект Д2	3,6	6,9	7,0	6,0	7,1	7,0	6,5
Дефект Д3	2,7	5,3	5,0	4,0	5,2	4,9	4,2
Дефект Д4	1,5	2,8	2,2	2,0	2,9	2,2	2,2
Среднее значение S	3,2	5,9	5,8	4,9	6,0	5,8	5,3

5.2 Экспериментальная апробация способа ТНК с применением нагрева и принудительного охлаждения

Экспериментальную апробацию разработанного способа ТНК проводили на контрольных образцах №2 и №24, поверхность которых характеризовалась различной шероховатостью и коэффициентом излучения (от 0,92 до 0,96) и, следовательно, различным уровнем мультипликативной составляющей температурного шума. В частности, контрольный образец №2, описание которого приведено в Главе 3, был окрашен матовой краской черного цвета для обеспечения коэффициента излучения на уровне 0,96. На рисунке 5.5 показан контрольный образец №2 с обозначенной синим прямоугольником зоной ТНК, на которой красной пунктирной линией показаны области внутренних дефектов. Следует отметить, что эксперименты ТНК проводили способом тепловизионного сканирования, параметры которого были подобраны таким образом, чтобы в поле зрения тепловизора зона контроля находилась в течение оптимальных времен τ_m обнаружения дефектов Д4 и Д7, а именно, с 27-й по 40-ю секунду.

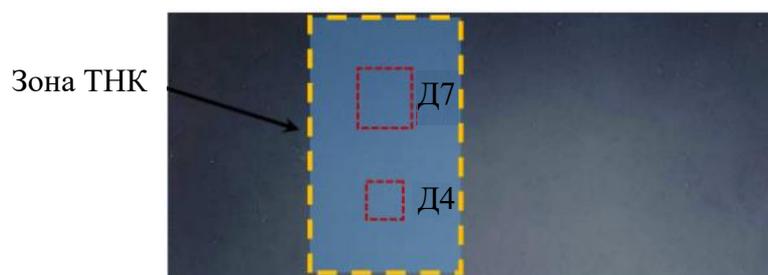


Рисунок 5.5 – Зона ТНК и схема расположения дефектов Д4 и Д7 в контрольном образце №2

Контрольный образец №24 (рисунок 5.6) представлял собой пластину размерами 300×200×12 мм, состоящую из двух склеенных с помощью эпоксидной смолы слоев: верхний слой состоял из 25-и слоев углеродной ткани (суммарная толщина 8 мм), нижний слой был изготовлен из дюралюминия (толщина 4 мм). Исследования проводили на части контрольного образца, содержащей 6 плоскодонных несквозных отверстий (дефекты Д1-Д6) диаметром 10 мм и глубиной от 1 до 6 мм. Диапазон оптимального времени τ_m обнаружения дефектов Д1-Д6 составлял от 25 до 80 секунд. Коэффициент излучения поверхности контрольного образца №24 был близок к 0,92, что соответствует углепластику.

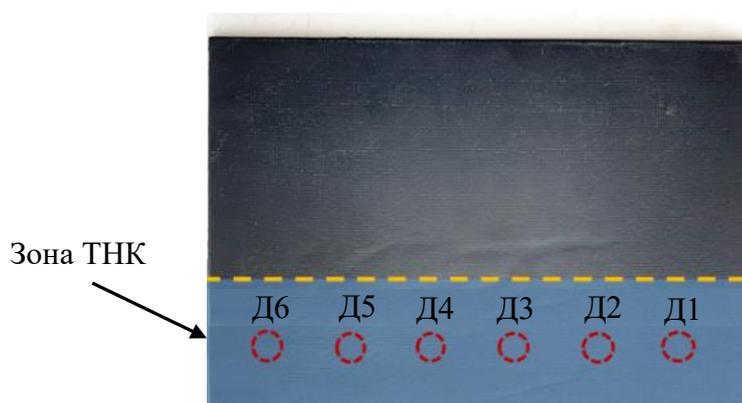


Рисунок 5.6 - Зона ТНК и схема расположения дефектов Д1- Д6 в контрольном образце №24

На рисунке 5.7 показана роботизированная лабораторная установка, с помощью которой был проведен ТНК способом тепловизионного сканирования с принудительным конвекционным охлаждением. Охлаждение осуществляли с помощью разработанного устройства на базе 4-х термоэлектрических

преобразователей, канального радиатора и 5-и вентиляторов [180]. В процессе ТНК образцы перемещали вертикально снизу в верх с помощью роботизированного манипулятора с постоянной скоростью. Нагрев осуществляли с помощью линейной галогенной лампы, а регистрацию температуры проводили с помощью тепловизора с разрешением 640×480 точек. Экспериментальным путем и по результатам численного моделирования были определены следующие параметры: оптимальная мощность принудительного охлаждения, приближающая текущую температуру контролируемой поверхности к начальной температуре образца; оптимальный момент времени начала принудительного охлаждения, находящийся непосредственно перед наступлением максимума температурных сигналов обнаруживаемых дефектов; расстояние между источником принудительного охлаждения и передним краем источника нагрева; диапазон времени, в течение которого контролируемый образец должен находиться в поле зрения тепловизора.

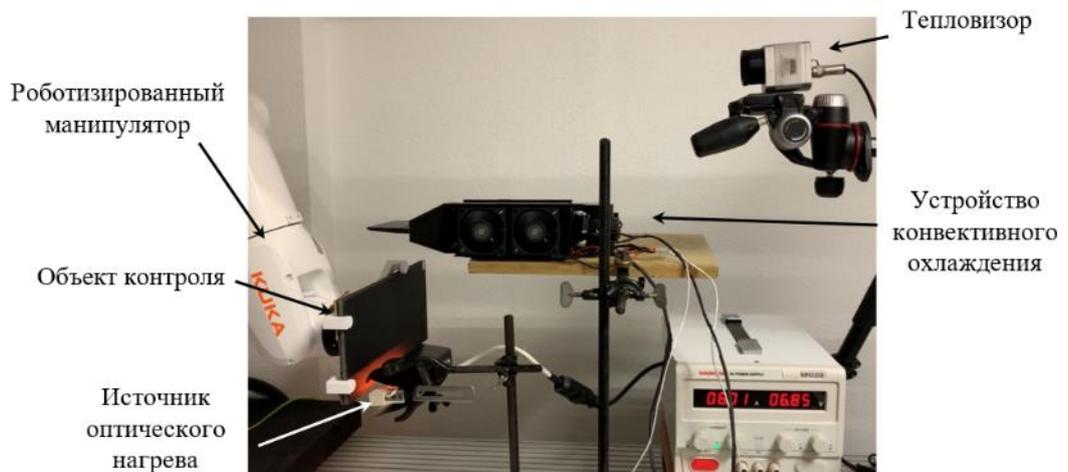


Рисунок 5.7 - Экспериментальная роботизированная установка, реализующая ТНК способом сканирования с принудительным охлаждением

Как было отмечено выше, поверхности контрольных образцов №2 и №24 характеризовались различным коэффициентом излучения, и, соответственно, различным уровнем температурного шума, который согласно уравнению (5.1) характеризуется амплитудой контраста шума C_n .

$$C_n = \sigma_T / T_{avg} \quad (5.1)$$

где σ_T - стандартное отклонение температуры в бездефектной области, T_{avg} средняя температура в выбранной бездефектной области [1].

В частности, уровень контраста шума C_n для контрольного образца №2 был экспериментально определен на уровне 3 %, а для контрольного образца №24 – на уровне 5,7 % (см. рисунок 5.8).

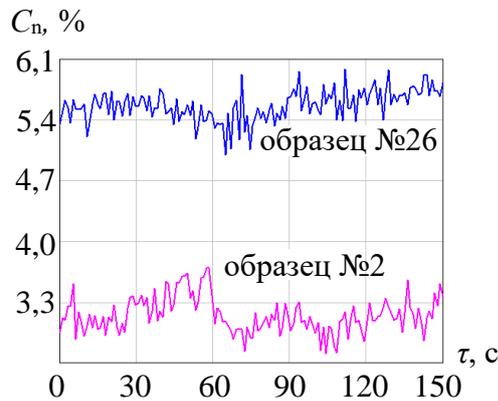
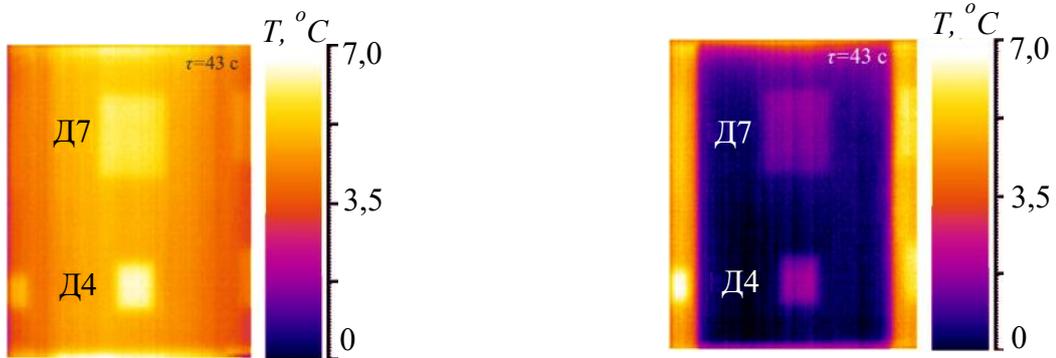


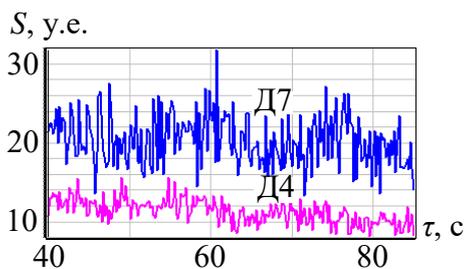
Рисунок 5.8 - Флуктуации контраста шума C_n в бездефектной зоне контрольных образцов №2 и №26

На рисунке 5.9 *а, б* приведены термограммы контрольного образца №2, полученные способом тепловизионного сканирования с принудительным охлаждением и без него. На обеих термограммах уверенно распознаются дефекты Д4 и Д7, однако в случае контроля с принудительным охлаждением величина отношения сигнал/шум S приблизительно вдвое ниже, чем без него, что видно по графикам на рисунке 5.9 *в, г*. В соответствии с результатами численного моделирования графики температурных контрастов C , в случае применения принудительного охлаждения, демонстрируют резкий подъем (рисунок 5.9 *е*) вследствие того, что избыточная температура бездефектной области T_{nd} приблизилась к нулю, однако кратковременный рост температурного контраста C не привел к улучшению визуального распознавания внутренних дефектов. В результате экспериментально подтверждено, что использование принудительного охлаждения при ТНК объектов, поверхность которых характеризуется низким уровнем температурных шумов, не приводит к улучшению результатов с точки зрения дефектоскопии, т.е. визуального выявления дефектов. Это объясняется тем,

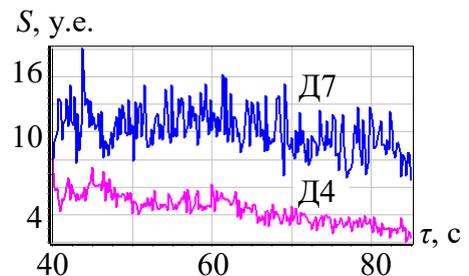
что при низком уровне температурного шума C_n лучше выявляются дефекты, обеспечивающие максимальные температурные сигналы ΔT , которые, в свою очередь, прямо пропорциональны поглощенной тепловой энергии W .



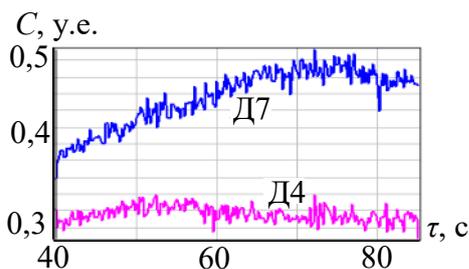
а) термограмма зоны дефектов Д4 и Д7 без принудит. охлаждения ($\tau = 43$) б) термограмма зоны дефектов Д4 и Д7 с принудит. охлаждением ($\tau = 43$)



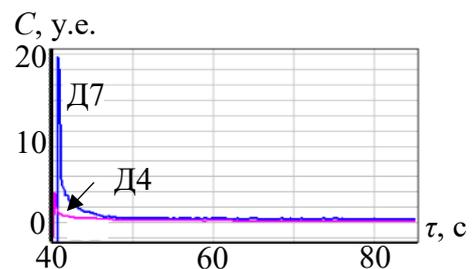
в) графики отношения сигнал/шум S для ТНК без принудит. охлаждения



г) графики отношения сигнал/шум S для ТНК с принудит. охлаждением



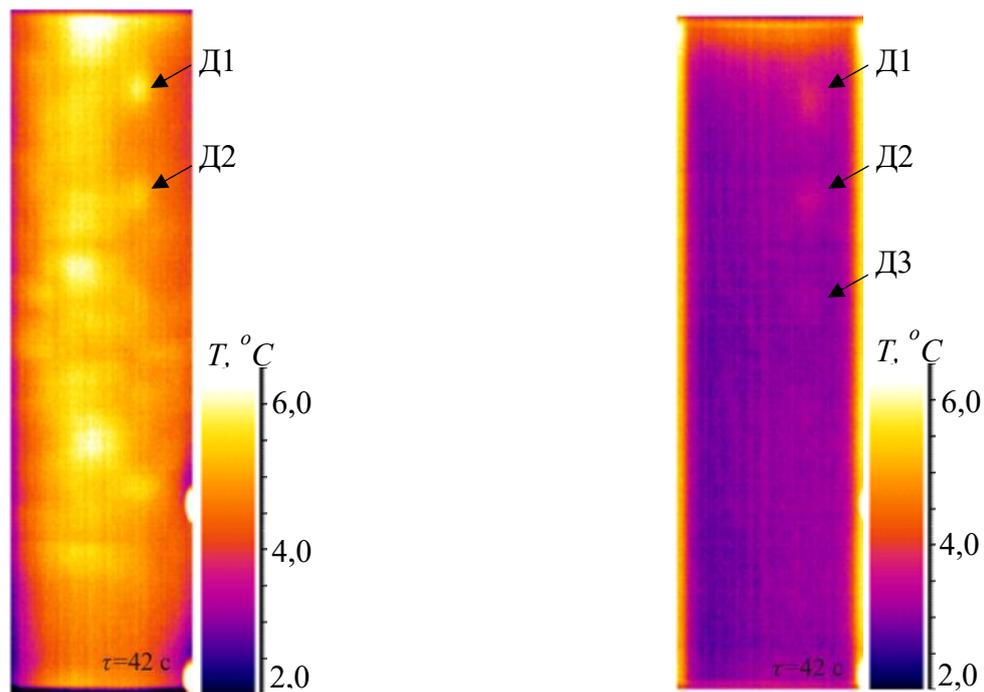
д) графики температурного контраста C для ТНК без принудит. охлаждения



е) графики температурного контраста C для ТНК с принудит. охлаждением

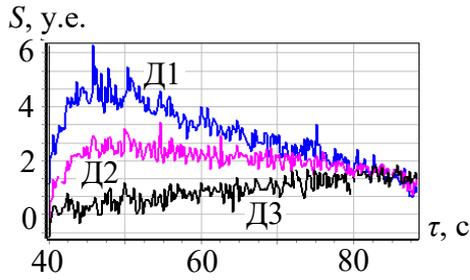
Рисунок 5.9 - Результаты ТНК контрольного образца №2 способом тепловизионного сканирования с принудительным охлаждением и без него

Рисунок 5.10 иллюстрирует результаты ТНК контрольного образца №24, из которых следует, что принудительное охлаждение «сглаживает» температурные шумы и обеспечивает лучшее визуальное распознавание внутренних дефектов. Из графиков (рисунок 5.10 *в-е*) видно, что амплитуды температурных контрастов S существенно выше при ТНК с принудительным охлаждением. То же наблюдается с величиной отношения сигнал/шум S (для дефектов Д2 и Д3 величина S почти в два раза выше, чем при использовании принудительного охлаждения). Дополнительная обработка результатов обеих процедур ТНК, для которой использовали МАГК, улучшила визуальное распознавание дефектов. В частности, при использовании принудительного охлаждения визуально распознаются 5 дефектов (Д1-Д5), а без принудительного охлаждения - 3 дефекта (Д1-Д3) на фоне ряда ложных температурных индикаций (см. рисунок 5.10 *ж, з*).

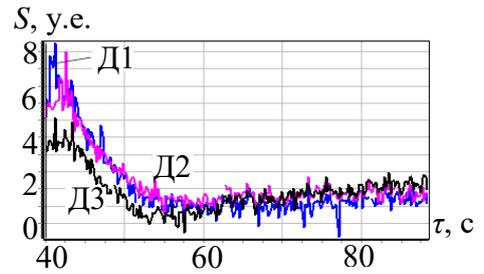


а) термограмма зоны дефектов Д1-Д6 без принудит. охлаждения ($\tau = 42$ с)

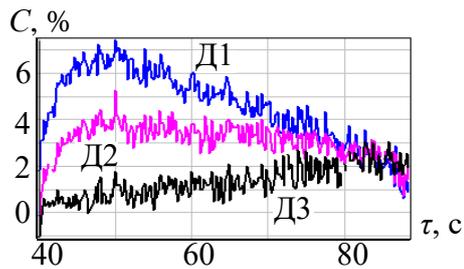
б) термограмма зоны дефектов Д1-Д6 с принудит. охлаждением ($\tau = 42$ с)



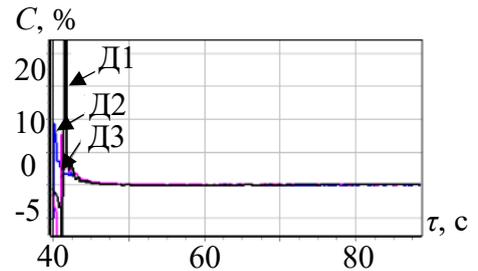
в) графики отношения сигнал/шум S для ТНК без принудит. охлаждения



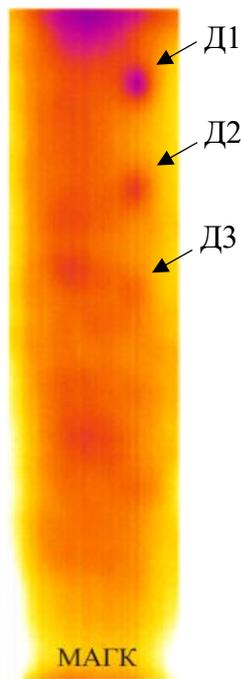
г) графики отношения сигнал/шум S для ТНК с принудит. охлаждением



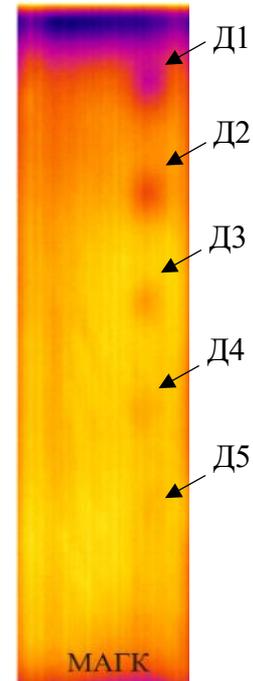
д) графики температурного контраста C для ТНК без принудит. охлаждения



е) графики температурного контраста C для ТНК с принудит. охлаждением



ж) карта дефектов (по МАГК) без принудит. охлаждения



з) карта дефектов (по МАГК) с принудит. охлаждением

Рисунок 5.10 - Результаты ТНК контрольного образца №24 способом тепловизионного сканирования

Таким образом, впервые в практике ТНК, по результатам теоретических и экспериментальных исследований доказано, что применение принудительного охлаждения улучшает результаты ТНК материалов и изделий, поверхность которых характеризуется повышенной/неравномерной шероховатостью, а также неоднородным коэффициентом излучения, что приводит к возникновению существенных температурных шумов, например, из-за отражений посторонних предметов. Следует отметить, что предложенный способ и методика его реализации несколько осложняют процедуру ТНК и требует использования специализированной аппаратуры для его реализации.

5.3 Разработка новых методик ТНК с применением оптических, контактных и конвективных источников нагрева

В большинстве случаев проведение ТНК связано с использованием оптических источников нагрева, что обусловлено относительной простотой их применения и возможностью реализовать достаточно равномерный, мощный и с требуемой длительностью импульс нагрева. Однако поглощённая объектом контроля энергия, излучаемая в видимом диапазоне спектра, существенно зависит от свойств поверхности. В частности, оптический нагрев наиболее эффективен при ТНК объектов с равномерным коэффициентом излучения (на уровне 0,94 - 0,96), который можно обеспечить, например, путем окрашивания контролируемой поверхности матовой краской черного цвета. При этом использование оптического нагрева при ТНК поверхностей, окрашенных в светлые тона, характеризующихся низкой шероховатостью и коэффициентом излучения менее 0,7, что характерно для гражданской авиационной техники, приводит к снижению его результативности и повышению риска обнаружения ложных дефектов [182]. Кроме того, ТНК неокрашенных ПКМ, например, стеклопластиковых обшивок, полупрозрачных в видимом диапазоне спектра излучения, также характеризуется низкой эффективностью при оптическом нагреве ввиду поглощения энергии внутри объекта контроля [183-194]. Принимая во внимание перечисленные факты, а также

ориентированность настоящих диссертационных исследований на практическое применение ТНК, была разработана методика испытаний изделий с неравномерным коэффициентом излучения, в том числе ниже 0,7, а также материалов, полупрозрачных в видимом диапазоне длин волн, с использованием способа тепловизионного сканирования. Суть исследований заключалась в использовании различных типов источников нагрева, а именно, оптического, конвективного и контактного, эффективность которых была определена экспериментальным путем.

5.3.1 Сравнение трех типов нагревателей для обнаружения дефектов в материалах, прозрачных в видимом спектре излучения

В настоящих исследованиях были использованы три типа источников нагрева: оптический – на базе трубчатой галогенной лампы; конвективный – на базе промышленного фена с узким целевым соплом; контактный – в виде нагретого ролика с тканевой «рубашкой». Критерием сравнения эффективности источников нагрева являлось количество выявленных дефектов в контрольном образце №25, две части которого характеризовались существенно различной прозрачностью в видимом диапазоне длин волн. Для «уравнивания» энергии нагрева, которую передает каждый из источников стимуляции контролируемому объекту, был проведен подбор режимов их работы. В частности, поглощённую энергию нагрева оценивали с помощью медной пластины толщиной 0,3 мм (пластина была установлена в рамке и окрашена с двух сторон матовой краской черного цвета), а мощность нагревателей «подбирали» путем регулировки их питающего напряжения. Параметром оценки эквивалентности нагрева являлась избыточная температура обратной стороны медной пластины, регистрируемая с помощью тепловизора, непосредственно в зоне нагрева. Для этого каждый из источников тепловой стимуляции поочередно размещали с внешней стороны медной пластины, которую перемещали с помощью роботизированного манипулятора, как показано на рисунке 5.11.



Рисунок 5.11 – Роботизированная установка для ТНК способом тепловизионного сканирования. Процесс оптимизации параметров нагрева конвективным источником

Контрольный образец №25 (рисунок 5.12) представлял собой пластину из полиметилметакрилата размерами 480×180×4 мм, неокрашенная часть которой характеризовалась прозрачностью в видимом диапазоне длин волн на уровне 90 %, а вторая половина была окрашена четырьмя слоями черной краски, что обеспечило ее непрозрачность в видимом диапазоне длин волн. Обе половины контрольного образца №25 имели по 4 идентичных плоскодонных отверстия (всего в контрольном образце №25 было 8 дефектов: Д1-Д8) глубиной $h = 0,7; 1; 2; \text{ и } 3,1$ мм, исполненных на задней поверхности пластины.

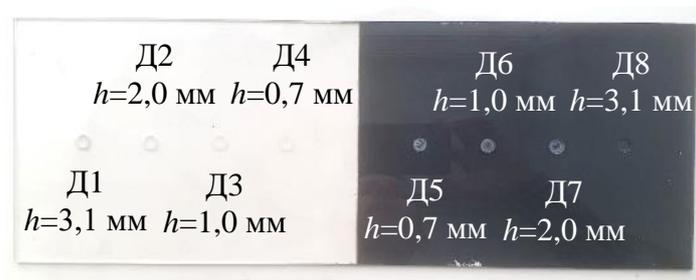


Рисунок 5.12 – Задняя поверхность контрольного образца №25 с плоскодонными дефектами

Контроль проводили в односторонней процедуре способом тепловизионного сканирования с помощью роботизированной установки (рисунок 5.11).

Результаты применения трех типов источников тепловой стимуляции, приведенные на рисунке 5.12 (данные приведены для 10-й секунды контроля), демонстрируют существенное различие в интенсивности и равномерности нагрева контрольного образца №25. В частности, видно, что оптический источник, реализованный на базе галогенной лампы, обеспечил равномерный и достаточный по мощности нагрев только окрашенной половины контрольного образца №25, причем визуально на 10-й секунде выявляется только один из наиболее глубоких дефектов Д8. Контактный нагреватель в виде ролика с тканевой «рубашкой» обеспечил существенную неравномерность нагрева, что вызвано нерегулярным контактом нагревательного ролика с контролируемой поверхностью. Однако данный вид нагрева позволил выявить оба наиболее глубоких дефекта Д1 и Д8, расположенных в двух половинах контрольного образца №25. Использование конвективного нагревателя (рисунок 5.12 в) характеризовался равномерностью нагрева обеих половин образца (холодная полоса вдоль всего образца связана с конструктивной особенностью выходного сопла нагревателя) и обеспечил выявление дефектов Д1 и Д8. Кроме того, было установлено, что конвективный нагрев в меньшей степени требователен к соблюдению фиксированной дистанции до контролируемой поверхности, чем, например, контактный вид нагрева.

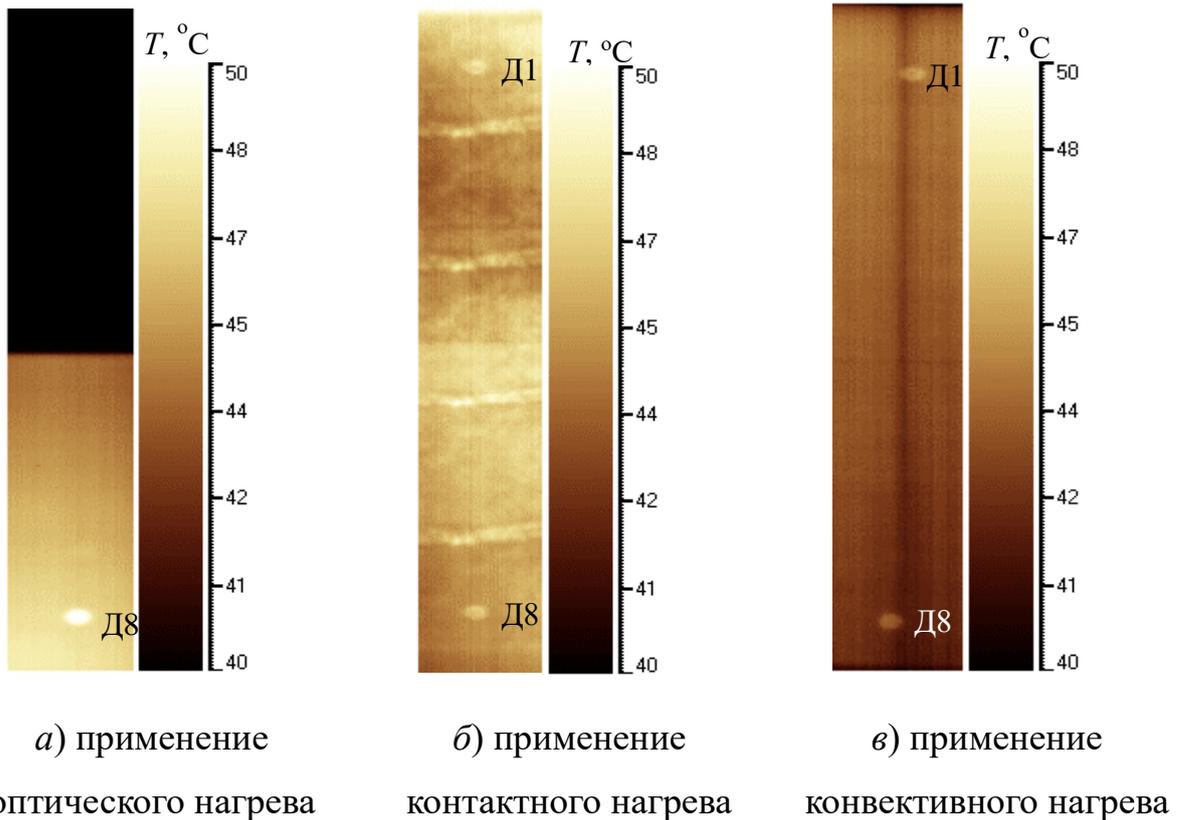


Рисунок 5.12 – Результаты ТНК способом тепловизионного сканирования с применением различных типов нагревателей

На рисунке 5.13 приведены результаты ТНК неокрашенной части контрольного образца №25, соответствующие 80-й секунде контроля. В частности, на рисунке 5.13 а, б видно, что при оптическом и контактном видах нагрева могут быть обнаружены только дефекты Д1 и Д2, что связано с малым количеством поглощённой энергии при оптическом нагреве и высоком уровне температурных шумов при контактном способе нагрева. В то же время при конвективном нагреве (рисунок 5.13 в) визуально выявляются дефекты Д1 - Д3.

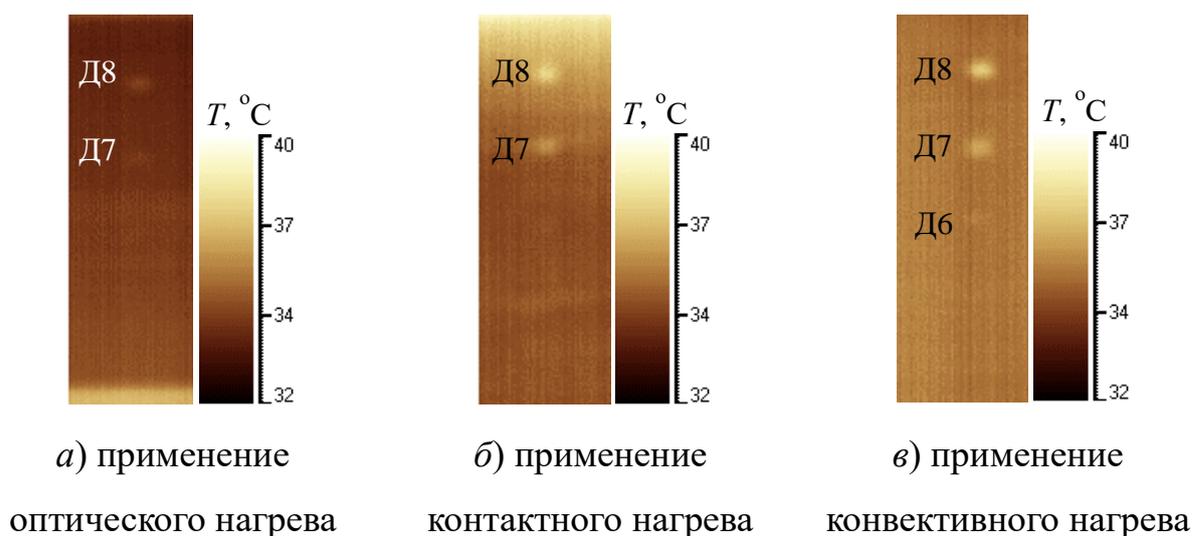


Рисунок 5.13 – Результаты ТНК неокрашенной части контрольного образца №25

Таким образом, установлено, что использование конвективного нагрева является оптимальным с точки зрения выявления дефектов в ПКМ, характеризующихся прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения.

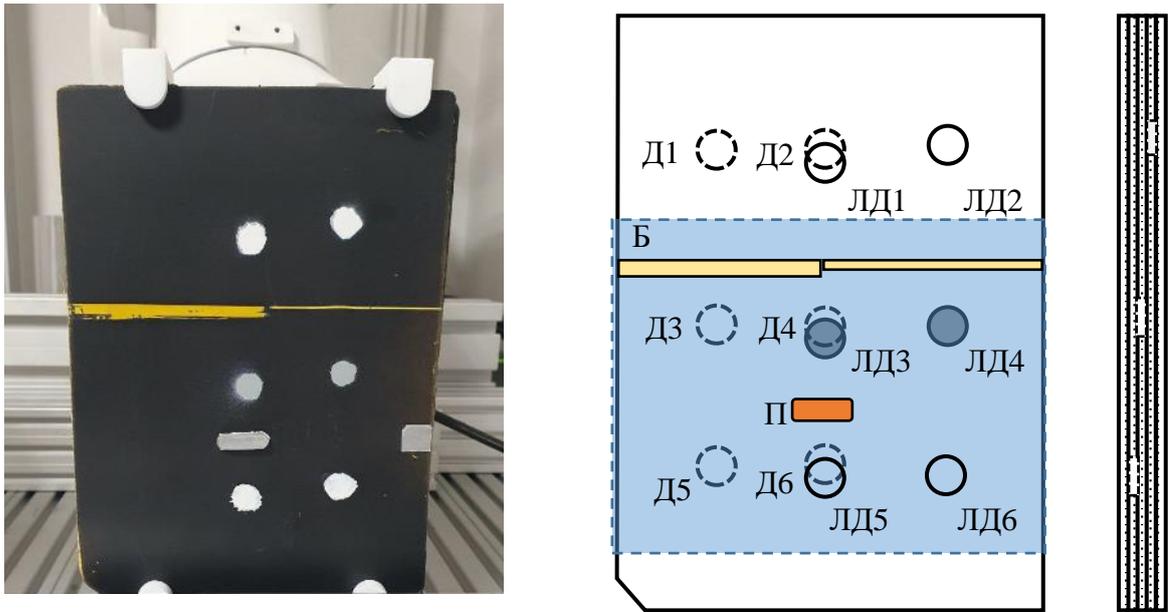
5.3.2 Сравнительная оценка эффективности оптического, контактного и конвективного типов нагрева при ТНК материалов с повышенным уровнем температурного шума

Практическое применение ТНК, как было неоднократно отмечено выше, сопряжено с рядом трудностей, которые могут быть преодолены программным и/или техническим путем. Речь идет о НК изделий авиационной и ракетно-космической техники, имеющих определенный тип и цвет покрытий, а также специфические технологические особенности, например, наличие заклепок и креплений различного вида, переходы толщины, зоны соединения деталей и т.п. Все перечисленные выше особенности объекта контроля существенно влияют на равномерность и интенсивность оптического нагрева, широко используемого в ТНК. Применение альтернативных источников тепловой стимуляции, а именно,

конвективного и контактного типов, обеспечивает нагрев контролируемой поверхности вне зависимости от ее цвета и прозрачности в видимом диапазоне длин волн, что было продемонстрировано при ТНК контрольного образца №25.

Для разработки методики практического применения ТНК способом тепловизионного сканирования была проведена серия экспериментальных исследований по определению эффективности конвективного и контактного источников нагрева при ТНК многослойных изделий, содержащих искусственные дефекты в виде внутренних расслоений, а также характеризующихся различного рода неоднородностями контролируемой поверхности. Новый подход имитации внутренних дефектов контрольных образцов, основанный на использовании эквивалентных имитаторов, описан в [195].

Для примера, ниже приведены результаты экспериментального исследования контрольного образца №26 (рисунок 5.14а), который представлял собой пластину размерами 200×150 и толщиной 10,4 мм, изготовленную из пяти слоев полимера (по ТФХ близкого к углепластику) толщиной 2 мм каждый. Контрольный образец №26 содержал 6 внутренних дефектов (Д1-Д6) в виде расслоений ($d = 10$ мм, $d_z = 2$ мм, $h = 2; 4; 6$ мм), заполненных воздухом. Кроме того, на контролируемой поверхности образца, окрашенной черной матовой краской, были нанесены ложные дефекты в виде круглых пятен диаметром 10 мм белого (ЛД1, ЛД2, ЛД5, ЛД6) и серого цвета (ЛД3, ЛД4), а также линия-царапина (Б) с отсутствием покрытия (черная краска была удалена механически). С целью имитации конструкционной особенности, выступающей над контролируемой поверхностью, был наклеен слой полиметилметакрилата (зона П) размером 10×3 и толщиной 3 мм. Следует отметить, что дефекты Д2, Д4 и Д6, были частично перекрыты ложными дефектами ЛД1, ЛД3 и ЛД5. Схема дефектов контрольного образца №26 показана на рисунке 5.14 б.



а) вид контролируемой поверхности
образца №26

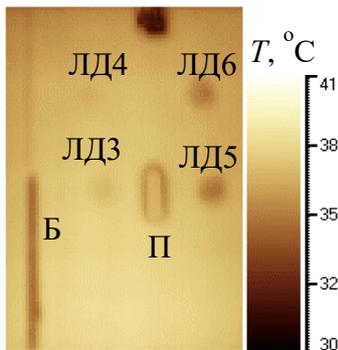
б) схема расположения дефектов
контрольного образца №26

Рисунок 5.14 – Контрольный образец №26 с внутренними дефектами и неоднородностью контролируемой поверхности

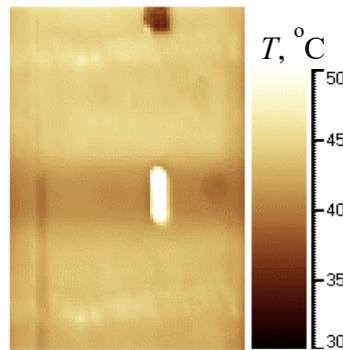
Экспериментальные исследования с применением трех типов нагревателей были проведены с помощью роботизированной установки (см. рисунок 5.11) способом тепловизионного сканирования. Ввиду ограниченной ширины полосы нагрева, обусловленной габаритными размерами используемых источников нагрева, ТНК контрольного образца №26 проводили в зоне, обозначенной голубым цветом (см. рисунок 5.14 б). Термограммы реконструированных последовательностей, соответствующие различным временам наблюдения и полученные при использовании трех типов нагревателей, приведены на рисунке 5.15.

Дефект покрытия (зона Б) визуально распознается на 5-й секунде ТНК при использовании всех трех типов нагревателей (рисунок 5.15 а, б, в), а также на протяжении первых 25-ти секунд ТНК при оптическом нагреве (рисунок 5.15 а, г, ж, к, н). Ложные дефекты ЛД3-ЛД6 при оптическом нагреве явно распознаются на протяжении первых 15-и секунд ТНК, а ложный дефект ЛД6

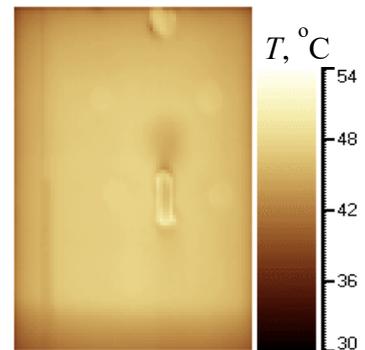
виден и на 55 секунде контроля. Также на 55 секунде распознаются внутренние дефекты ДЗ-Д6 (рисунок 5.15 *р*). При контактном нагреве ложные дефекты ЛДЗ-ЛД6 не проявились, однако наличие выступающей части (зона П) не позволило нагреть области дефектов Д4, Д6 (см. рисунок 5.15 *б, д, з, л, о, с*), что негативно сказалось на результатах ТНК. Несмотря на это, использование контактного вида нагрева позволило выявить дефекты ДЗ, Д5, Д6 (см. рисунок 5.15 *с*) на 55 секунде ТНК. Ложные дефекты (ЛДЗ-ЛД6) слабо проявлялись в течение первых 5-ти секунд ТНК при конвективном нагреве, что обусловлено бóльшим слоем краски в данных зонах (рисунок 5.15 *в*), а дефекты Д5, Д6 начинают проявляться (рисунок 5.15 *и*) уже с 15-й секунды ТНК и характеризуются максимумом температурного контраста C на 25-й секунде. В итоге, ТНК с конвективным нагревом позволил выявить 4 дефекта внутренней структуры (ДЗ-Д6). Следует отметить, что конвективный нагрев обеспечил максимальные температурные контрасты C для дефектов ДЗ и Д6.



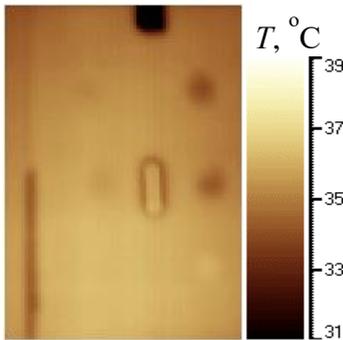
а) результаты
оптического нагрева
(5-я секунда контроля)



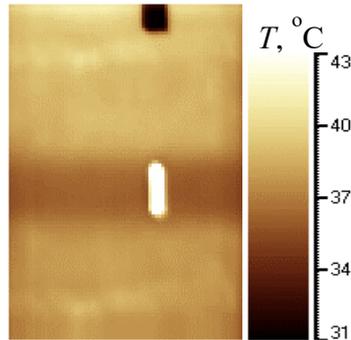
б) результаты
контактного нагрева
(5-я секунда контроля)



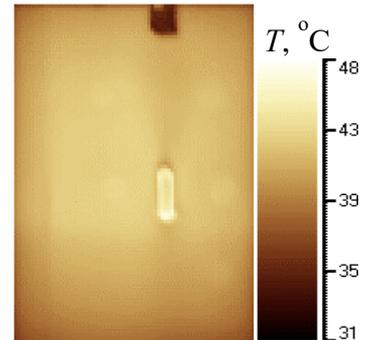
в) результаты
конвективного нагрева
(5-я секунда контроля)



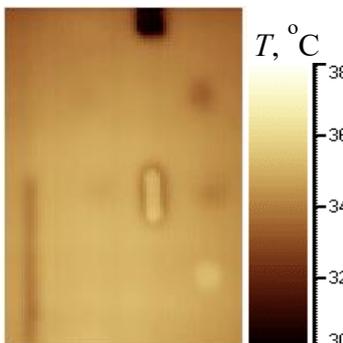
г) результаты
оптического нагрева
(10-я секунда контроля)



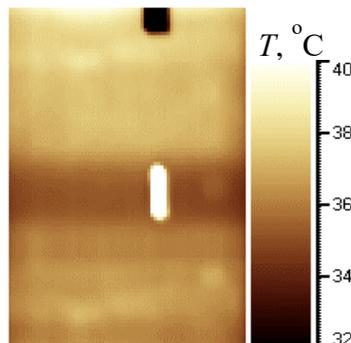
д) результаты
контактного нагрева
(10-я секунда контроля)



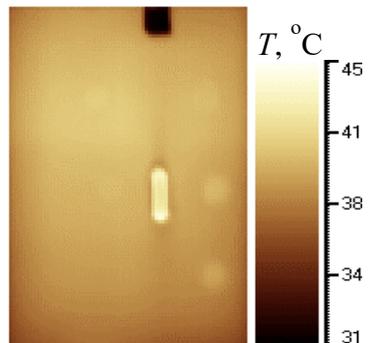
е) результаты конвективного
нагрева
(10-я секунда контроля)



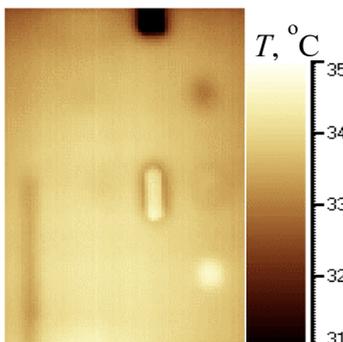
ж) результаты
оптического нагрева
(15-я секунда контроля)



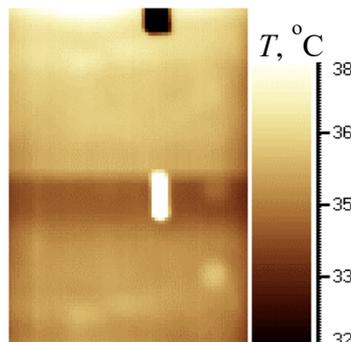
з) результаты
контактного нагрева
(15-я секунда контроля)



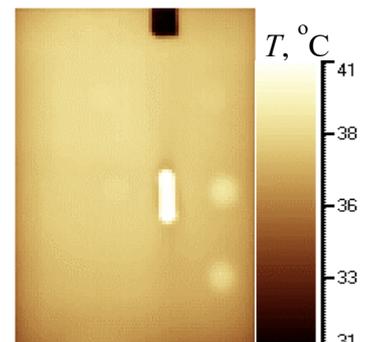
и) результаты конвективного
нагрева (15-я секунда
контроля)



к) результаты
оптического нагрева
(20-я секунда контроля)



л) результаты
контактного нагрева
(20-я секунда контроля)



м) результаты конвективного
нагрева (20-я секунда
контроля)

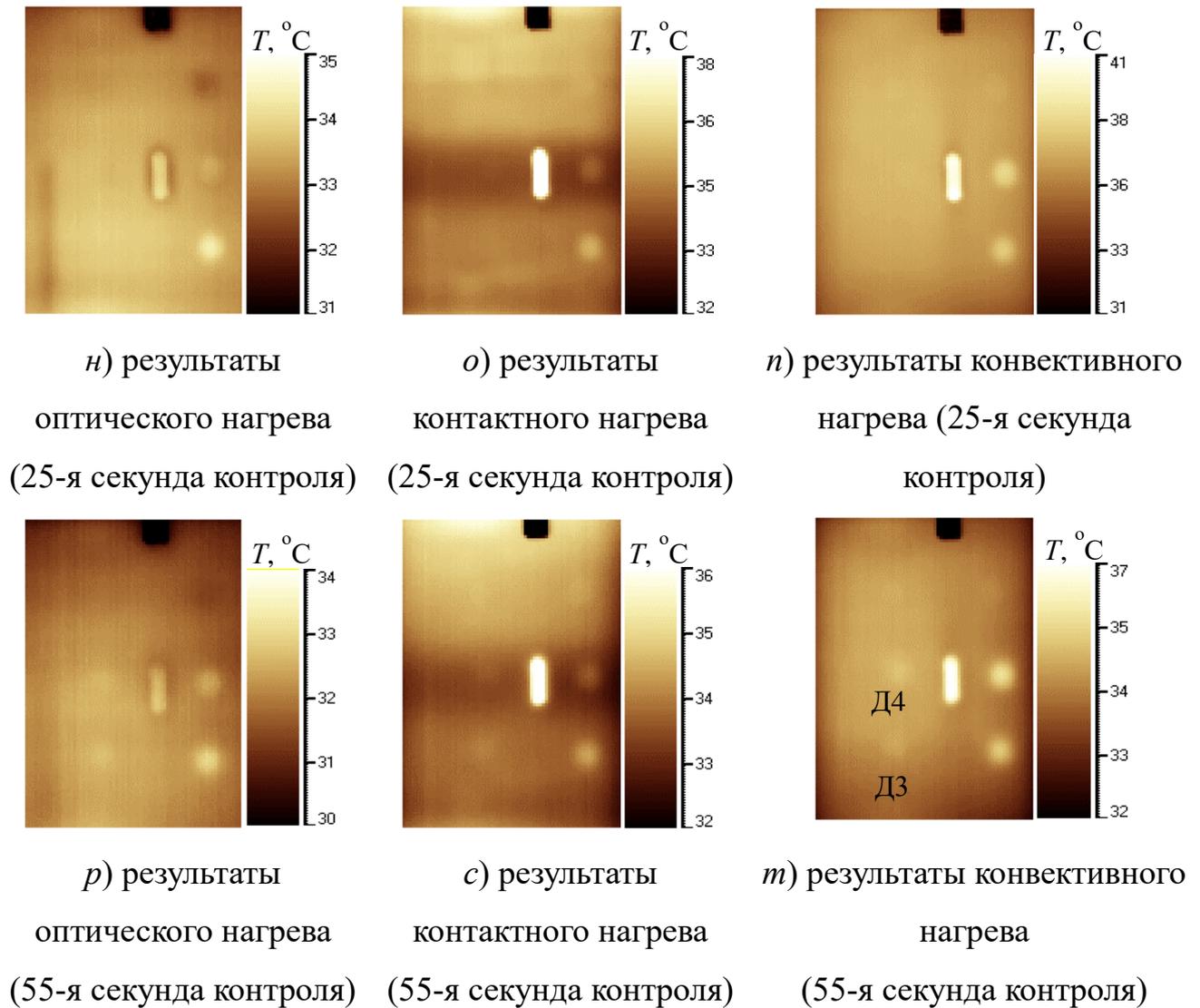
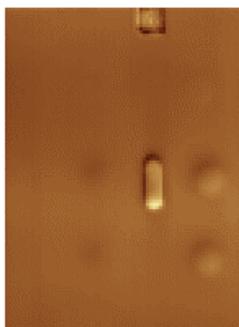


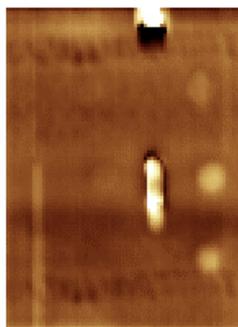
Рисунок 5.15 – Результаты ТНК контрольного образца №26 с применением трех типов нагревателей

Применение математических алгоритмов обработки данных несущественно улучшило результаты ТНК (см. рисунок 5.16). В частности, при обработке результатов по МАГК, полученных с использованием конвективного нагрева, было выявлено 4 из 4-х дефектов; обработка результатов при контактном нагреве подчеркнула неравномерность нагрева, характерную для начала процесса контроля, в результате чего было выявлено 2 из 4-х истинных дефекта, следует отметить, что ложный дефект ЛД6 проявился после обработки по МАГК. На изображении 4-й главной компоненты для оптического нагрева визуально распознаются 3 из 4-х

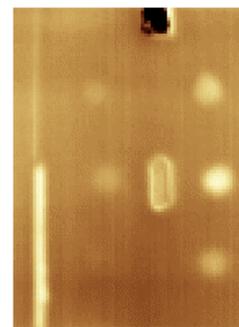
истинных дефекта, а также 2 ложных дефекта, кроме того, дефект покрытия (зона Б) визуально распознается как внутреннее расслоение (см. рисунок 5.16 в).



а) результаты при конвективном нагреве



б) результаты при контактном нагреве



в) результаты при оптическом нагреве

Рисунок 5.16 – Обработка результатов ТНК контрольного образца №26 по МАГК

5.4 Выводы по Главе 5

Тепловой неразрушающий контроль наиболее пригоден для испытаний материалов и изделий, свойства которых близки к свойствам абсолютно черного тела, то есть характеризуются коэффициентом излучения, близким к единице (такие поверхности не создают температурных шумов) и не обладают прозрачностью в видимой части спектра излучения. При этом следует заметить, что изделия эксплуатируемой техники, изготовленные из композитов, могут характеризоваться светлыми тонами окраски, а неокрашенные изделия из стеклопластиковых ПКМ (например, лопасти вертолётных винтов при их производстве) имеют частичную прозрачность в видимом спектре излучения. Тепловой контроль таких материалов и изделий является проблематичным.

В настоящей Главе описаны новые процедуры ТНК, представляющие собой модификации способа тепловизионного сканирования. Эти процедуры существенно улучшают результаты ТНК материалов и изделий,

характеризующихся существенными шумами и частичной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения.

Применение двух импульсов тепловой стимуляции является решением проблемы ТНК качества ПКМ, а также различного рода покрытий, с низким температурным порогом деструкции и высоким уровнем температурных шумов. В частности, по экспериментальным данным было установлено, что импульс принудительного охлаждения, примененный после основного импульса нагрева, что обеспечивает кратковременное снижение температуры контролируемой поверхности до исходной в момент максимума температурного сигнала от дефекта, приводит к повышению температурного контраста до 10 раз, а отношения сигнал/шум до 2-х раз. Эти результаты были подтверждены экспериментальными данными и данными численного моделирования (с применением программного модуля ThermoCalc_HC) ТНК изделий, характеризующихся уровнем температурного шума поверхности выше 5 %.

Применение конвективного и контактного видов нагрева в процедуре ТНК способом тепловизионного сканирования позволило решить проблему контроля качества неокрашенных материалов, характеризующихся частичной прозрачностью в видимом диапазоне. Кроме того, полученные экспериментальные данные ТНК изделий с неравномерным коэффициентом поглощения поверхности, а также данные ТНК изделий с окраской белого и серого тонов, коэффициент поглощения поверхности которых ниже 0,7, продемонстрировали высокую эффективность обнаружения внутренних дефектов. Однако при ТНК изделий, имеющих выступающие элементы, например, заклепки, ребра и т.п., конвективный вид нагрева обеспечил более равномерное температурное поле контролируемой поверхности, что обеспечило соответственное повышение эффективности дефектоскопии. На устройства, реализующие ТНК способом тепловизионного сканирования с применением источников контактного и конвективного типов нагревателей, Соискателем поданы соответствующие заявки на патенты РФ №2024138277 и №2024138445.

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ТНК ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ И ПРИНЦИПАМИ ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ

Основные преимущества ТНК перед УЗ и радиационным контролем были отмечены в предыдущих Главах и, в основном, заключаются в высокой производительности испытаний, достоверности обнаружения приповерхностных дефектов, наглядности результатов контроля, а также возможности их обработки в автоматизированном режиме (ТНК обычно сравнивают с УЗ НК и РК ввиду широкого применения этих методов в промышленности). Кроме того, ТНК, в его термоакустической реализации (тепловой контроль с УЗ стимуляцией), имеет преимущества перед вихретоковым НК и контролем проникающими веществами, особенно при обнаружении трещин с малым (до 3 мкм) и нулевым раскрытием (сомкнутых трещин), в том числе, расположенных на обратной стороне контролируемой поверхности и не выходящих на нее. Речь идет об обнаружении внутренних трещин, в том числе, в многослойных структурах и изделиях со сложной геометрической формой, а также трещин, расположенных под покрытиями, например, под жаропрочными покрытиями лопаток турбин [196-204].

По сравнению с контролем методом свободных колебаний, который заключается в «простукивании» объекта контроля и обнаружении расслоений оператором на слух, ТНК характеризуется большей повторяемостью результатов испытаний и иллюстративностью их представления. Кроме того, ТНК является более достоверным по сравнению с УЗ НК при обнаружении воды в ячейках авиационных сотовых панелей, особенно, в тех случаях, когда ячейки заполнены не целиком, то есть вода не контактирует с внутренней стороной обшивки сотовой панели. Продолжая список преимуществ ТНК, следует упомянуть его эффективность при контроле расслоений теплозащитных и гидроизоляционных покрытий, а также их отслоений от металлического основания. Такие покрытия характеризуются высокой пористостью и могут состоять из нескольких слоев с различной плотностью, что ограничивает применимость других видов НК.

Практическое применение ТНК обеспечивается использованием соответствующего оборудования, которое может быть реализовано как на базе роботизированных манипуляторов и самодвижущихся устройств, предназначенных для контроля крупногабаритных изделий в условиях эксплуатации, так и портативных устройств для контроля отдельными зонами и способом тепловизионного сканирования. Кроме того, для практической реализации ТНК могут быть использованы стационарные установки, представляющие собой лаборатории-ячейки, оснащенные несколькими источниками тепловой стимуляции, а также узкоспециализированные установки, ориентированные на контроль конкретных серийных изделий (см. рисунок 6.1).

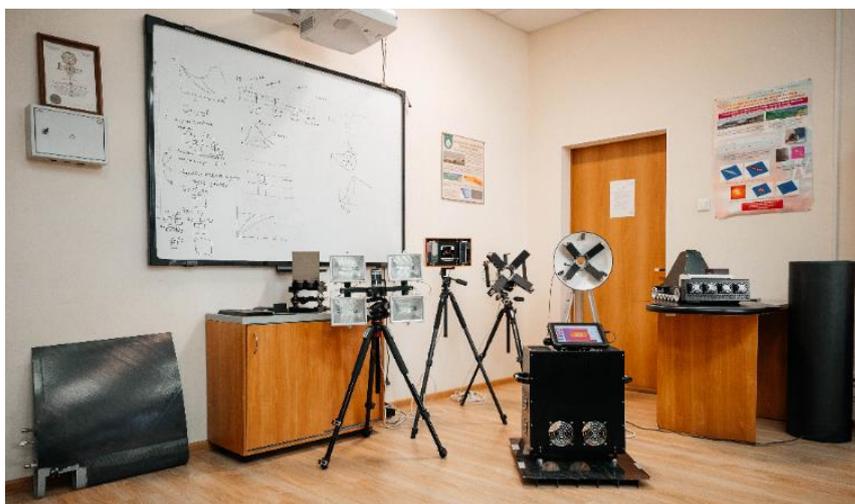


Рисунок 6.1 – Модификации портативных и самодвижущихся тепловых дефектоскопов, разработанных в ТПУ (г. Томск)

В настоящей Главе описаны разработанные Соискателем устройства активного ТНК, а также приведены результаты их применения. Следует отметить, что ряд разработок внедрен на промышленные предприятия в виде опытных образцов, что подтверждается соответствующими актами, приведенными в Приложении Б.

6.1 Роботизированная система ТНК крупногабаритных цилиндрических объектов

В Главе 3 были подробно описаны особенности активного ТНК способом тепловизионного сканирования, а также проведено сравнение получаемых результатов с результатами классического одностороннего ТНК. Кроме того, в Главе 3 была изложена методика проведения контроля крупногабаритных цилиндрических изделий этим способом. Ниже описана система ТНК на базе роботизированного манипулятора и линейного источника нагрева длиной 1 м, которая обеспечивает уникальную производительность сплошного контроля до 25 м² в час.

В ТПУ (г. Томск) совместно с Уральским Робототехническим Центром «Альфа-Интех» (г. Челябинск) был разработан и изготовлен роботизированный комплекс ТНК крупногабаритных цилиндрических изделий, реализующий способ тепловизионного сканирования. На рисунке 6.2 приведена фотография роботизированного комплекса и его трёхмерная модель. Основными элементами комплекса являются линейный источник нагрева, тепловизионный модуль, роботизированный манипулятор и система вращения цилиндрического объекта контроля. Тепловизионный модуль регистрирует температурное поле участка поверхности объекта контроля с определенной временной задержкой, величина которой связана со скоростью вращения цилиндрического объекта, ТФХ контролируемого материала и предполагаемой глубиной залегания дефектов [139, 152].

Таким образом, основными параметрами, устанавливаемыми при проведении ТНК с помощью разработанной системы, являются: 1) линейная скорость перемещения контролируемой поверхности относительно поля зрения тепловизора; 2) длина полосы нагрева, которая определяет производительность испытаний; 3) ширина полосы нагрева, которая совместно со скоростью линейного перемещения определяет длительность нагрева отдельного участка поверхности контролируемого объекта; 4) время задержки – время между началом нагрева и

началом регистрации температурных полей поверхности объекта контроля тепловизором (следует отметить, что время задержки рассчитывают для конкретных типов материалов и толщин изделий, а также параметров потенциальных дефектов); 5) размер области, которая попадает в поле зрения тепловизора, обычно соответствующая длине полосы нагрева; 6) частота записи термограмм, связанная с линейной скоростью перемещения контролируемой поверхности и реальной, то есть на поверхности изделия, величиной пикселя термограммы. Очевидно, что реализация ТНК способом тепловизионного сканирования является более трудоёмкой в сравнении с классической односторонней процедурой ТНК.



а) роботизированный манипулятор с линейным источником нагрева



б) трёхмерная модель комплекса ТНК крупногабаритных цилиндрических изделий

Рисунок 6.2 – Роботизированная установка ТНК крупногабаритных объектов способом тепловизионного сканирования

В таблице 6.1 приведены основные технические характеристики роботизированной установки ТНК.

Таблица 6.1 – Технические характеристики роботизированной установки ТНК крупногабаритных цилиндрических изделий

Состав установки	Роботизированный манипулятор, система линейного перемещения, линейный источник нагрева, тепловизионный модуль, система вращения объекта контроля
Обнаруживаемые дефекты	Расслоения и отслоения, утонения теплозащитных покрытий, инородные включения
Тип контролируемых объектов	Цилиндрические металлические изделия с теплозащитным и гидроизоляционным покрытием, цилиндрические изделия из полимерных композиционных материалов диаметром до 3 м
Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	5×5 (при глубине залегания 4 мм и толщине 0,1 мм)
Максимальная глубина обнаруживаемого дефекта, мм	до 12 (для дефекта размерами 10×10×0,2 мм)
Производительность сплошного контроля, м ² /ч	до 25
Максимальная избыточная температура нагрева контролируемой поверхности, °С	до 100

Продолжение таблицы 6.1	
Параметры автоматизации	ТНК цилиндрических объектов отдельными кольцевыми областями с последующей сшивкой результатов в результирующее панорамное изображение, автоматизированный контроль текущей температуры в зоне нагрева и управление мощностью нагрева, автоматизированная обработка результатов контроля с целью обнаружения дефектов и определения их параметров с помощью алгоритмов на базе ИНС

Как было отмечено ранее, важным условием проведения ТНК является соблюдение температурного режима в зоне нагрева, что связано с возможной деструкцией материалов по причине его перегрева. Для этого в модифицированный узел нагрева описанной выше системы ТНК был интегрирован пирометр для непрерывного измерения температуры непосредственно в зоне действия источника нагрева, т.е. в зоне максимальных температур. В случае выхода значения текущей температуры в зоне нагрева из «безопасного» для конкретного материала диапазона (диапазон устанавливает оператор согласно технической документации на материал объекта контроля), оператор получает соответствующее оповещение, а система в автоматизированном режиме регулирует мощность нагрева и продолжает проведение испытаний. В случае, если температура контролируемой поверхности находится вне «безопасного» диапазона, а лимит регулировки исчерпан, то система автоматически выключает источник нагрева и останавливает процесс контроля. Следует отметить, что оператор задает именно диапазон рабочих температур, что связано с флуктуациями текущих температурных значений в зоне нагрева, которые могут быть вызваны локальными изменениями коэффициента излучения

контролируемой поверхности, ее шероховатостью, наличием внутренних дефектов, а также переменной толщиной. Кроме того, применение способа тепловизионного сканирования при ТНК крупногабаритных изделий сопровождается накоплением большого объема температурных данных и подразумевает реконструкцию исходных последовательностей термограмм в результирующего панорамного изображения, по которому проводят оценку дефектности объекта контроля в целом. При этом, процедура ТНК крупногабаритного цилиндрического объекта требует соблюдения определённой стратегии проведения испытаний для получения наглядной результирующей карты дефектов, например, проведение ТНК с чередованием кольцевых областей.

Для обработки накопленных температурных данных при ТНК крупногабаритных изделий, разработанная система может быть оснащена программным обеспечением для автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии с помощью алгоритма на базе ИНС. Пример результатов контроля отслоения теплозащитных покрытий приведен на рисунке 6.3. Подробное описание работы автоматизированного алгоритма обработки данных, реализованного на базе ИНС, приведено в Главе 4.

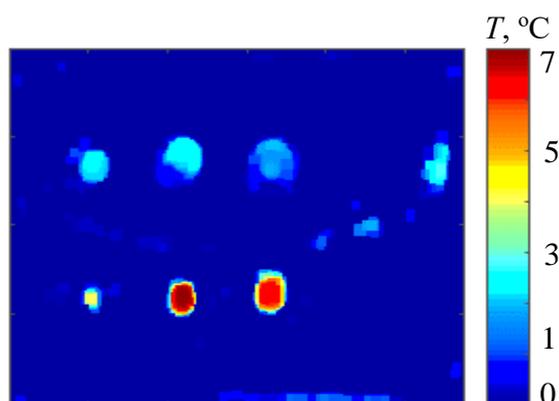


Рисунок 6.3 - Результаты автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии имитатора теплозащиты на металле, полученные способом тепловизионного сканирования (адаптировано из [139])

6.2 Самодвижущийся тепловой дефектоскоп для ТНК плоских крупногабаритных изделий

Использование роботизированной техники в виде различного рода манипуляторов, обеспечивает высокую повторяемость и производительность ТНК, а также позволяет в условиях цеха и лаборатории проводить НК материалов и изделий на стадии их изготовления с целью обнаружения дефектов производственного типа.

Для проведения ТНК в «полевых» условиях наиболее пригодны портативные тепловые дефектоскопы; в случае, если речь идет о контроле крупногабаритных изделий регулярной формы, целесообразно использовать самодвижущиеся дефектоскопические устройства.

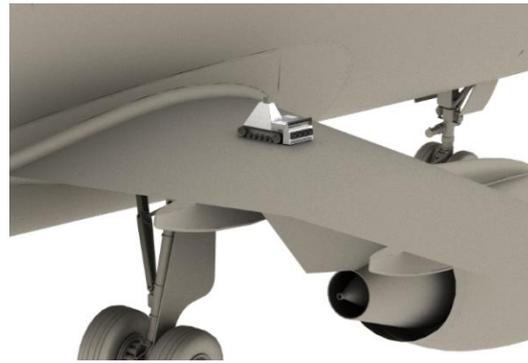
В рамках диссертационных исследований разработан самодвижущийся тепловой дефектоскоп, который представляет собой передвижную платформу, дистанционно управляемую оператором, на которой установлены линейный оптический источник нагрева и тепловизор. Передвижная платформа реализована на базе роликов и ремней, которые обеспечивают плавность хода и достаточную площадь контакта с контролируемой поверхностью, предотвращая «сползание» устройства при передвижении по поверхности с небольшим уклоном. Внешний вид дефектоскопа приведен на рисунке 6.4.

Следует отметить, что данная система предназначена для перемещения по горизонтально ориентированным плоским крупногабаритным объектам, таким как крыло самолета МС-21, с целью обнаружения производственных (расслоений и непроклеев) и эксплуатационных (ударных повреждений) дефектов. Устройство реализует ТНК способом тепловизионного сканирования и, фактически, является аналогом роботизированного комплекса с сопоставимыми производительностью контроля и наглядностью получаемых результатов. Основным преимуществом самодвижущегося дефектоскопа, помимо более низкой стоимости, является возможность использовать его в полевых условиях. Подобные устройства на рынке тепловых дефектоскопов на момент подготовки диссертационной работы

отсутствуют, что делает разработку оригинальной (существуют прототипы самодвижущегося устройства, реализующие ТНК отдельными зонами, что по сути является аналогом портативных/переносных систем). Основным недостатком дефектоскопа является фиксированное расстояние от источника нагрева до переднего края поля зрения тепловизора, что позволяет контролировать дефекты в определенном диапазоне глубин их залегания.



а) вид самодвижущегося теплового дефектоскопа в лабораторных условиях



б) трёхмерная модель возможного применения дефектоскопа при контроле крыла самолета МС-21 в ходе его технического обслуживания

Рисунок 6.4 – Самодвижущийся тепловой дефектоскоп

В таблице 6.2 приведены основные технические характеристики самодвижущегося теплового дефектоскопа, а также области его применения.

Таблица 6.2 – Технические характеристики самодвижущегося теплового дефектоскопа

Состав установки	Моторизованная платформа, линейный источник нагрева, тепловизор, система дистанционного управления
------------------	--

Продолжение таблицы 6.2	
Обнаруживаемые дефекты	Расслоения, утонения, инородные включения, ударные повреждения в монолитных ПКМ, вода в сотовых конструкциях, отслоения и расслоения теплозащитных покрытий, нанесенных на металлическое основание
Тип контролируемых объектов	Плоские крупногабаритные изделия из угле- и стеклопластиков, сотовые и сэндвич панели, металлические оболочки с покрытиями
Глубины залегания выявляемых дефектов, мм	до 9 (для дефекта размерами 10×10×0,2 мм)
Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	3×3 (на глубине 4 мм, толщиной 0,1 мм)
Площадь зоны одновременного контроля, м ²	0,07
Производительность сплошного контроля, м ² /ч	до 20
Способ управления движением	дистанционный
Максимальная избыточная температура нагрева объекта контроля, °С	до 70
Масса дефектоскопа, кг	12
Габаритные размеры дефектоскопа, м	0,5×0,4×0,4
Потребляемая мощность, кВт	2

На рисунке 6.5 показан процесс лабораторных испытаний самодвижущегося теплового дефектоскопа при ТНК крупногабаритного изделия, которое имитировали набором из 10-и контрольных образцов №5-12, 16, 17, 21, 22, описанных в Главе 4.



Рисунок 6.5 – Лабораторные испытания самодвижущегося теплового дефектоскопа при ТНК набора контрольных образцов способом тепловизионного сканирования

На рисунке 6.6 показаны результаты ТНК, представляющие собой панорамную карту дефектов (изображение было разделено на 3 части для компактного расположения на странице), полученную с помощью автоматизированного алгоритма обработки данных на базе ИНС. Подробное описание методики автоматизированной обработки результатов ТНК и структура ИНС приведены в Главе 4. Следует отметить, что в процессе проведения многократных испытаний по периметру некоторых контрольных образцов возникли расслоения, которые в данном случае также были классифицированы как дефекты.

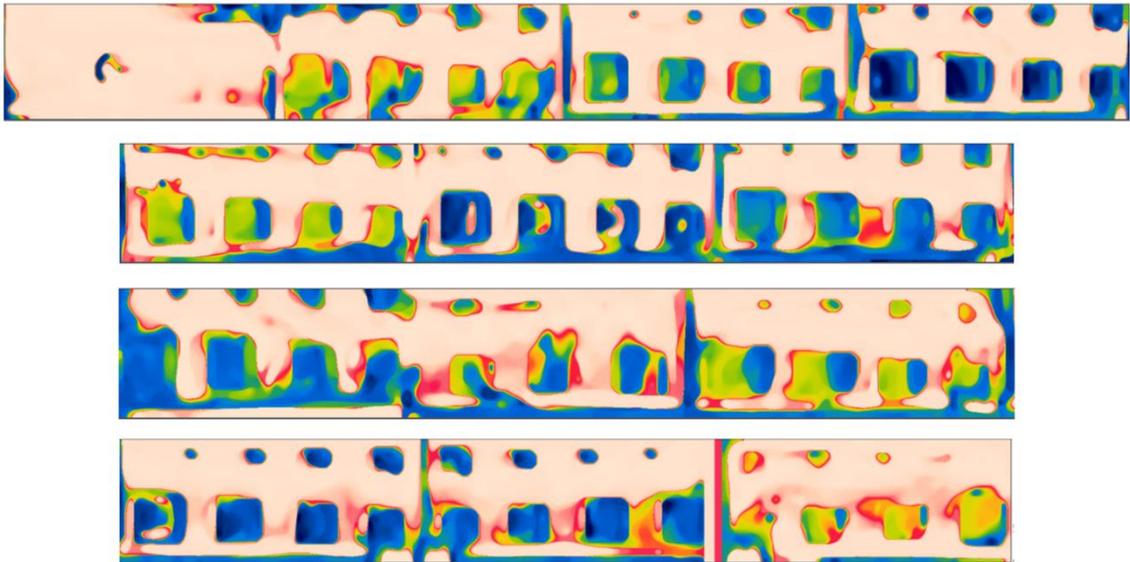


Рисунок 6.6 – Результат ТНК набора контрольных образцов – имитатора крупногабаритного объекта, полученные непрерывно способом тепловизионного сканирования с помощью самодвижущегося теплового дефектоскопа, с последующей обработкой с помощью алгоритмов на базе ИНС (адаптировано из [146])

6.3 Роботизированные системы ТНК с комбинированными источниками нагрева на базе оптических и УЗ излучателей

Различные типы дефектов ПКМ, а именно, расслоения, инородные включения, неравномерность толщины, эффективно выявляют с использованием оптического, конвекционного или контактного видов нагрева [205-209]. В односторонней процедуре ТНК тепловая энергия накапливается над низкотеплопроводными дефектами относительно большой поперечной площади, приводя к локальным температурным аномалиям значительной амплитуды на фоне общего повышения температуры объекта контроля. Для обнаружения трещин с малой шириной раскрытия, в том числе, «сомкнутых» дефектов (с нулевым раскрытием), эффективна стимуляция механическими колебаниями УЗ частоты, которые генерируют с помощью магнитострикционных или пьезоэлектрических преобразователей - техника «термоакустического контроля» [210-213]. Изменение

температуры в зоне дефектов обусловлено рядом физических феноменов, из которых существенным является трение «берегов» трещин и краев разорванных волокон, что приводит к генерации тепловой энергии и локальному повышению температуры в зонах неоднородностей, но без изменения температуры в бездефектных областях. Комбинирование способов нагрева позволяет расширить диапазон разновидностей выявляемых дефектов, восприимчивых к конкретному типу нагрева, что существенно повышает эффективность ТНК [214-219].

Применение термоакустического способа ТНК подразумевает ввод УЗ колебаний в различные области объекта контроля, особенно, если речь идет о контроле изделий сложной геометрической формы или крупногабаритных изделий [220, 221]. Следует отметить, что по опыту Соискателя, радиус эффективной зоны обнаружения дефектов ПКМ зачастую не превышает 150 мм. В связи с этим, для ТНК с УЗ стимуляцией разрабатывают установки, которые ориентированы на контроль определенного серийного изделия (описание таких установок приведено в следующем разделе настоящей Главы), а ввод колебаний с УЗ частотой предусмотрен в конкретную область объекта контроля. Для численного моделирования процессов тепловыделения в зонах дефектов при термоакустическом контроле в ТПУ (г. Томск) был разработан программный модуль ThermoSon [222]. Более универсальный подход с возможностью автоматизации процедуры ТНК подразумевает использование роботизированных манипуляторов, на которые, помимо источников УЗ стимуляции, можно разместить источники стимуляции, например, оптического типа.

На рисунке 6.7 показан роботизированная лабораторная установка для комбинированного ТНК, реализующая оптический и УЗ виды стимуляции. Ввиду того, что при оптическом нагреве повышается температура всей поверхности объекта контроля, а при термоакустическом ТНК возникает лишь локальный нагрев в зоне дефектов, на практике бывает достаточным суммирование получаемых результатов при поочередно используемых двух видах нагрева. В таблице 6.3 приведены основные технические характеристики роботизированной установки комбинированного ТНК.

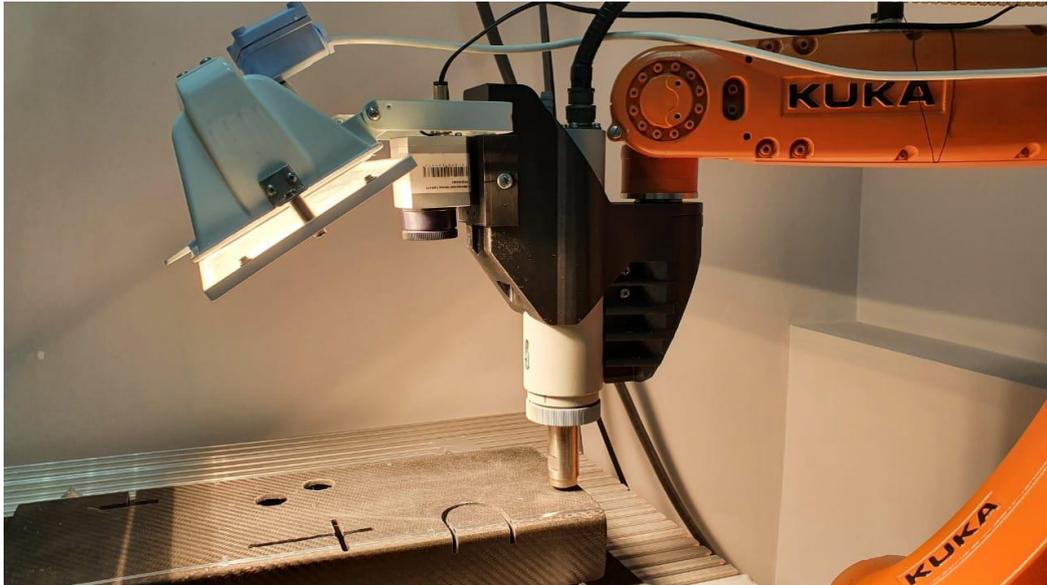


Рисунок 6.7 – Роботизированная лабораторная установка комбинированного ТНК в процессе оптического нагрева части композиционной детали сложной геометрической формы

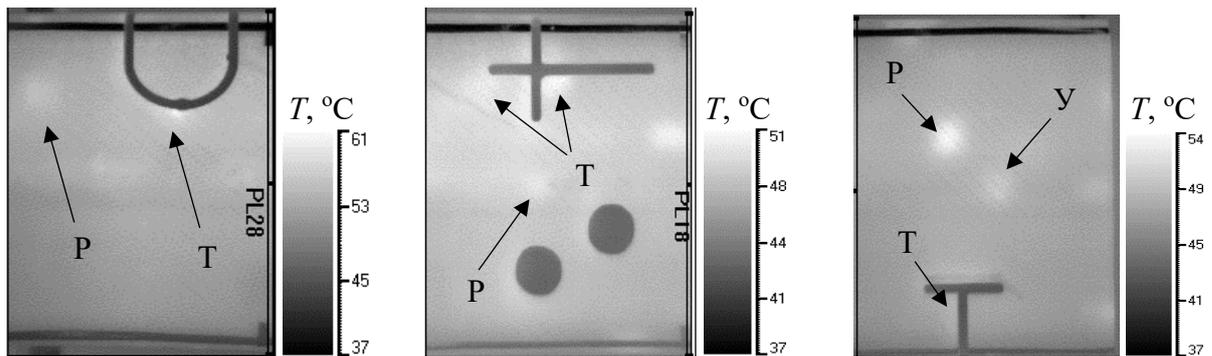
Таблица 6.3 – Технические характеристики роботизированной установки комбинированного ТНК

Состав установки	Роботизированный манипулятор, система оптического нагрева, система УЗ стимуляции, тепловизор
Обнаруживаемые дефекты	Расслоения и отслоения, ударные повреждения, трещины
Тип контролируемых объектов	Изделия из полимерных композиционных материалов различной геометрической формы, металлические изделия
Глубины залегания выявляемых дефектов, мм	до 8
Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	0,01×0,2

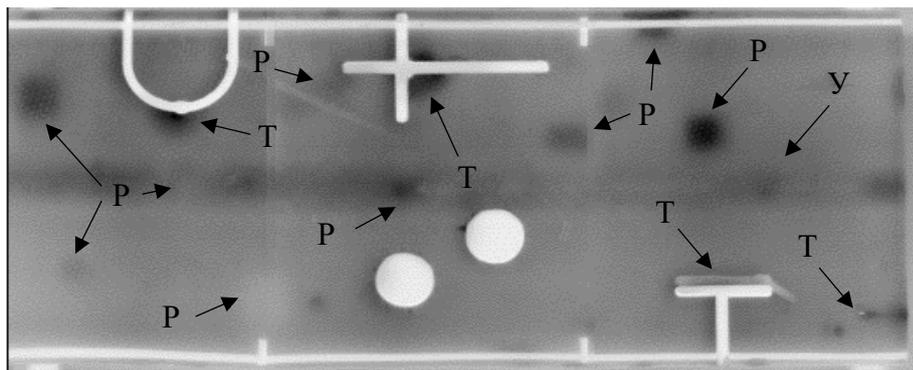
продолжение таблицы 6.3	
Площадь зоны одновременного контроля, м ²	0,04
Производительность сплошного контроля, м ² в час	до 4
Потребляемая мощность, кВт	до 4

Результаты применения роботизированной системы комбинированного ТНК приведены на рисунке 6.8. В качестве объекта контроля была использована углепластиковая панель с Ш - образной формой сечения, содержащая несколько типов дефектов, а именно, инородные включения, имитирующие расслоения (зоны Р), ударные повреждения (зоны У) и растрескивания на краях технологических отверстий (зоны Т). Ввиду больших размеров панель была условно разделена на три равные части, каждую из которых контролировали сначала с использованием УЗ стимуляции, затем с помощью оптического нагрева. Затем результаты были суммированы таким образом, чтобы на синтезированной последовательности термограмм визуально распознавались дефекты, выявляемые двумя видами нагрева. Для проведения синтеза результатов ТНК, полученных с использованием различных источников тепловой стимуляции был разработан программный модуль ThermoFusion [223]. На рисунке 6.8 а показаны синтезированные термограммы трех отдельных зон объекта контроля, на которых видны растрескивания ПКМ в зонах технологических отверстий (зоны Т), выявленные при УЗ стимуляции, а также имитаторы внутренних расслоений (зоны Р), выявленные при оптической стимуляции. Синтезированное панорамное изображение всей углепластиковой панели показано на рисунке 6.8 б. Видно, что зона центрального стрингера (ввиду большей толщины материала в данной области) имеет меньшую температуру, по сравнению с температурой бездефектной области, ряд близко расположенных к поверхности расслоений характеризуется инверсией температурных сигналов, причины которой были описаны в Главе 2. На рисунке 6.8 в приведена карта дефектов, полученная с использованием

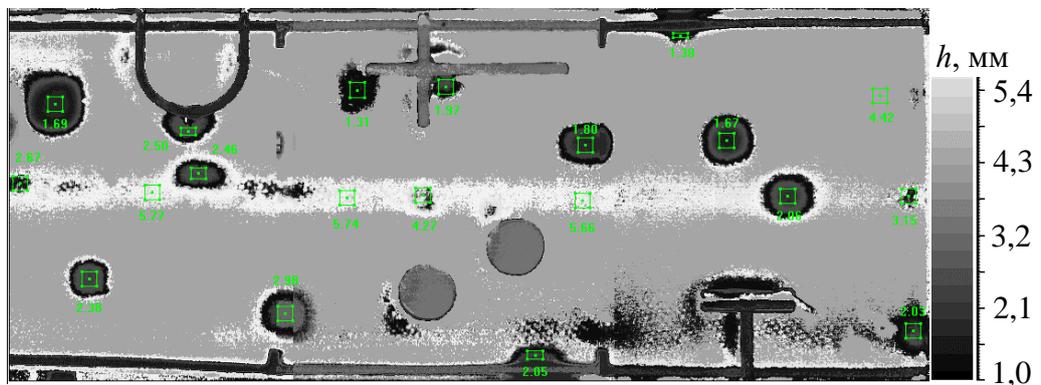
автоматизированного алгоритма на базе ИНС, на которой явно видны дефектные области, которые могут быть классифицированы по типам дефектов. Цветовая шкала показывает глубину залегания дефектов (зеленым цветом на карте дефектов обозначены области, для которых приведена глубина залегания). Методика реализации комбинированного ТНК приведена в Приложении В.



а) термограммы трех зон контроля образца



б) термограмма синтезированной панорамной последовательности



в) панорамная карта глубин дефектов, полученная с помощью ИНС

Рисунок 6.8 – Результаты комбинированного ТНК

6.4 Стационарные и портативные тепловые дефектоскопы с оптическими источниками нагрева для ТНК изделий по отдельным зонам

Помимо крупногабаритных изделий, а также изделий со сложной геометрической формой, ТНК часто применяют для исследования материалов и экспрессной оценки их ТФХ [160, 224-232], например, для исследования связи ударных повреждений и изменения ТФХ полимерных композиционных материалов. Зачастую возникает необходимость проведения ТНК однотипных образцов относительно небольших размеров и правильной геометрической формы (например, в виде пластин) в одно- и двухсторонней процедурах. Такие исследования требуют высокой повторяемости и соответствующей «чистоты» эксперимента. Разработанная в ТПУ (г. Томск) лабораторная установка (см. рисунок 6.9) пригодна также для решения исследовательских задач ТНК. Основным преимуществом установки является ее универсальность, а именно, возможность оснащения различными источниками стимуляции, например, оптического, УЗ и индукционного типов, а также тепловизорами различных форматов и технических уровней. Для повышения повторяемости и стабилизации процедур ТНК лабораторная установка оснащена моторизованными системами линейного перемещения источников симуляции и тепловизора, а также защитным чехлом для снижения уровня тепловых помех.



Рисунок 6.9 – Лабораторная установка ТНК с гибкой архитектурой для исследований ТФХ ПКМ и тепло- гидроизоляционных покрытий

Взаимное расположение объекта контроля, источников нагрева и тепловизора определяют в зависимости от типа, формы и размеров объекта контроля, а также в зависимости от того, какие ТФХ требуется определять, например, температуропроводность или тепловую инерцию, как наиболее используемые в ТНК. Технические характеристики лабораторной установки приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Технические характеристики лабораторной установки ТНК с гибкой архитектурой, в том числе предназначенной для оценки ТФХ ПКМ

Состав установки	Моторизованные направляющие, оптический/УЗ/ индукционный источники нагрева, тепловизор, система управления
Обнаруживаемые дефекты	Расслоения и отслоения, утонения, инородные включения, трещины, оценка ТФХ

Тип контролируемых объектов	Плоские крупногабаритные изделия из угле- и стеклопластиков, сотовые и сэндвич панели, теплозащитные и гидроизоляционные покрытия, нанесенные на металлическое основание
Глубины залегания выявляемых дефектов, мм	до 12 (для дефекта размерами 10×10×0,2 мм)
Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	3×3 (на глубине 4 мм, толщиной 0,1 мм)
Площадь зоны одновременного контроля, м ²	0,04
Производительность контроля, м ² в час	до 4,7
Предельные габаритные размеры контролируемого объекта, мм	600×600
Максимальная избыточная температура нагрева объекта контроля, °С	до 70
Масса установки, кг	75
Габаритные размеры установки, м	2×1,7×1,3
Потребляемая мощность, кВт	до 4

Для определения ТФХ материалов, дефектоскопии и дефектометрии изделий на стадии их производства и эксплуатации наиболее универсальными являются портативные тепловые дефектоскопы. В ТПУ (г. Томск), начиная с 2010 года, ведутся разработки различных модификаций портативных тепловых

дефектоскопов для работы в лабораторных и производственных условиях [4, 146, 153, 233-236]. На рисунке 6.10 приведена одна из модификаций теплового дефектоскопа, предназначенного для обнаружения ударных повреждений и расслоений в монолитных ПКМ, а также отслоений обшивки и воды в ячейках сотовых панелей [237, 238]. Фактически, применение портативного теплового дефектоскопа реализует классическую одностороннюю процедуру ТНК, которая по сравнению со способом тепловизионного сканирования обладает большими возможностями с точки зрения дефектометрии, а именно, определения глубины залегания дефектов, их толщины и поперечных размеров. Это объясняется отсутствием ограничений по времени регистрации температуры контролируемой области (более подробно преимущества и недостатки классического ТНК и испытаний способом тепловизионного сканирования описаны в Главе 3). Основные технические характеристики портативного теплового дефектоскопа приведены в таблице 6.5



а) дефектоскоп в режиме определения ТФХ объекта контроля



б) процесс ТНК композитной панели в «ручном» режиме

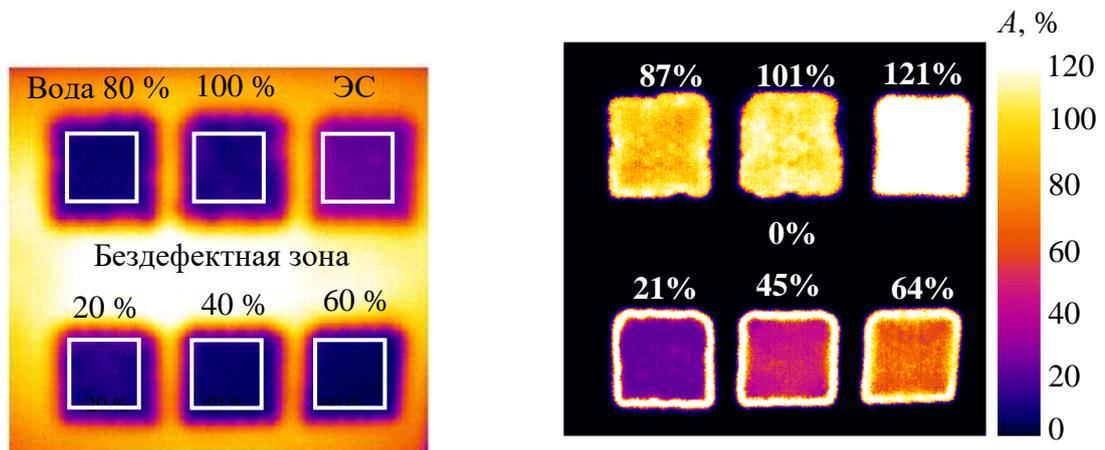
Рисунок 6.10 – Портативный тепловой дефектоскоп для ТНК ПКМ в лабораторных, производственных и полевых условиях

Таблица 6.5 – Технические характеристики портативного теплового дефектоскопа

Состав установки	Оптический источник нагрева, тепловизор, система управления, планшетный компьютер
Обнаруживаемые дефекты	Ударные повреждения, расслоения, утонения, инородные включения в монолитных ПКМ, вода в ячейках сотовых панелей, отслоение обшивки сотовых панелей
Тип контролируемых объектов	Плоские крупногабаритные изделия из угле- и стеклопластиков, сотовые и сэндвич панели, теплозащитные и гидроизоляционные покрытия, нанесенные на металлическое основание
Глубины залегания выявляемых дефектов, мм	до 12 (для дефекта размерами 10×10×0,2 мм)
Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	3×3 (на глубине 4 мм, толщиной 0,1 мм)
Площадь зоны одновременного контроля, м ²	0,04
Производительность сплошного контроля, м ² в час	до 4,7
Максимальная избыточная температура нагрева объекта контроля, °С	до 70
Масса установки, кг	6
Габаритные размеры дефектоскопа, м	0,6×0,5×0,3
Потребляемая мощность, кВт	2

Особенностью портативного теплового дефектоскопа является наличие планшетного компьютера, с помощью которого оператор управляет процессом контроля и получает результаты для их обработки и хранения. Следует отметить, что в ТПУ (г. Томск) в период с 2014 по 2016 годы был разработан программный комплекс для сбора и обработки результатов теплового контроля, предназначенный для теплового дефектоскопа Check-IR фирмы Automation Technology (Германия) [120]. Программный комплекс был передан ООО «Солютерм», представлявшей интересы компании Airbus, и в настоящее время принадлежащей ФАУ ЦАГИ [239]. Дефектоскоп оснащен программным обеспечением ThermoFit Pro, существенно превосходящим по функциональным возможностям программный комплекс, входящий в комплект дефектоскопа Check-IR, в частности, благодаря наличию программных модулей Thermo_NN и ThermoScan, которые обеспечивают дефектоскопию и дефектометрию в автоматизированном режиме с использованием ИНС (автоматизированные алгоритмы дефектоскопии и дефектометрии описаны в Главе 4), а также пространственную «сшивку» результирующих карт дефектов.

Пример проведения ТНК с использованием одного из разработанных в ТПУ (г. Томск) портативных тепловых дефектоскопов относится к обнаружению воды и определению ее количества в ячейках горизонтально ориентированной сотовой авиационной панели (см. рисунок 6.11). Следует отметить, что результаты ТНК относятся к случаю, когда между водой в частично заполненных ячейках сот и внутренней поверхностью обшивки имеются воздушные зазоры [240-243]. Такая схема контроля демонстрирует одно из ключевых преимуществ ТНК перед УЗ НК, поскольку, вследствие очевидных физических принципов, УЗ НК практически не выявляет воду при наличии воздушного зазора.



a) термограмма исходной последовательности (обозначенное количество воды в ячейках сот – цели обучения ИНС)

б) карта дефектов, показывающая количество воды в % от объема в ячейках сот

Рисунок 6.11 – Результаты ТНК воды в горизонтально ориентированной сотовой панели с помощью портативного теплового дефектоскопа

В частности, в сотовой панели были организованы несколько зон, ячейки которых через заднюю обшивку были заполнены различным количеством воды, а одна группа ячеек была заполнена эпоксидной смолой – зона ЭС (см. обозначение областей на рисунке 6.11 *a*). Обработка результатов ТНК с использованием ИНС позволила получить карту дефектов (рисунок 6.11 *б*), цвета которой, согласно шкале, соответствуют количеству воды в ячейках сот в процентах (зона, заполненная эпоксидной смолой, при обучении ИНС характеризовалась условной целью 120 %). Следует заметить, что эпоксидный клей в сотах не является дефектом, а представляет собой фактор помехи при диагностике воды.

В таблице 6.6 приведены результаты автоматизированного определения количества воды в ячейках сот, по которым видно, что наибольшая погрешность составила 5 и 7 % для участков с заполнением водой 40 и 80 %, что может быть

обусловлено перемещением воды внутри ячеек при проведении ТНК по сравнению с экспериментом, на результатах которого проводили обучение ИНС.

Таблица 6.6 – Результаты автоматизированного определения количества воды (в %) в ячейках сотовой панели, полученные с помощью ИНС

Фактическое наполнение	Процент наполнения ячеек сот						Бездефектные зоны
	Эпоксидная смола, 100 %	Вода					
		100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	
Цели обучения ИНС	120	100	80	60	40	20	0
Результаты дефектометрии	121	101	87	64	45	21	0
Относительная погрешность, %	1	1	7	4	5	1	0

6.5 Стационарная и портативная установки ТНК на базе источников УЗ стимуляции

Использование механических колебаний УЗ частоты для инициации тепловыделения в дефектных областях при одновременной регистрации тепловых полей с помощью тепловизора было предложено еще в 1970-х годах Henneke E.G и др. [244]. Соответствующий способ теплового неразрушающего контроля в зарубежной литературе известен как УЗ ИК термография, а в России - термоакустический контроль, или тепловой контроль с УЗ стимуляцией (схема ТНК термоакустическим способом показана в Главе 1 на рисунке 1.1 з) [245-250]. Стимуляцию тепловыделения дефектных областей осуществляют путем прижатия волновода магнито- или пьезоэлектрического преобразователя, работающего на частотах от 22 до 100 кГц. Механические колебания, вводимые в объект контроля,

приводят к локальному повышению температуры в зонах дефектов вследствие преобразования механической энергии в тепловую в результате внутреннего трения, пластической деформации, механического гистерезиса и эффекта термоупругости [197, 210, 252-260]. Мощность и длительность вводимых колебаний определяет размеры и глубину выявляемых дефектов, однако повышение мощности стимуляции может привести к повреждению объектов контроля в точках ввода УЗ колебаний.

Характерными особенностями термоакустического способа ТНК являются:

1) проведение испытаний в реальном времени на сравнительно большой площади вокруг точки ввода механических колебаний (до $0,25 \text{ м}^2$) [210];

2) отсутствие нагрева бездефектной области материала в ходе испытаний, что повышает вероятность обнаружения малых дефектов, генерирующих слабые температурные сигналы или дефекты, расположенные с обратной стороны контролируемого слоя материала;

3) возможность избирательного обнаружения трудно выявляемых другими методами трещин с малым или нулевым раскрытием, в которых возникает интенсивное выделение тепла.

В ТПУ (г. Томск) исследования в области термоакустического способа ТНК ударных повреждений полимерных композиционных материалов проводят с 2010 г., в том числе, как было отмечено выше, в комбинации с односторонней ТНК при оптической стимуляции [198, 210, 221, 252, 254, 260]. В частности, было определено, что мощность, выделяющаяся в зонах ударного повреждения в углепластиковом ПКМ, достигает десятки мВт [210]. Кроме того, Соискателем был проведен цикл предварительных исследований по обнаружению трещин в металлических изделиях цилиндрической формы, а также металлических и композитных изделий, изготовленных с использованием аддитивных технологий [118, 261, 262].

Для промышленного решения задач ТНК изделий сложной геометрической формы, используя термоакустический способ, в ТПУ (г. Томск) была разработана соответствующая стационарная установка, которая обеспечивает обнаружение

дефектов в ПКМ (см. рисунок 6.12) авиационной и ракетно-космической техники. Речь идет об обнаружении трещин, расслоений, ударных повреждений и других типичных для композитов дефектов, которые невозможно обнаружить, например, классическим односторонним ТНК или УЗ НК.

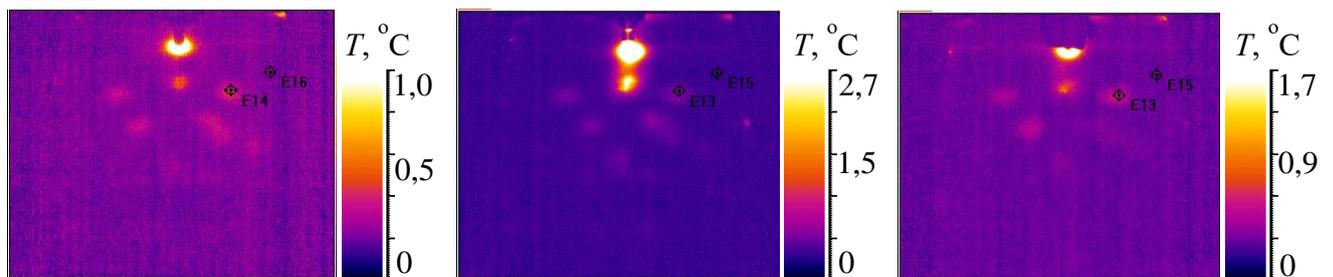


Рисунок 6.12 – Стационарная установка термоакустического контроля дефектов ПКМ

Особенностью разработанной установки является относительно большая рабочая область, которая обеспечивает ТНК объектов различной геометрической формы с максимальными размерами $1 \times 1 \times 1$ м. При этом, установка оборудована моторизированной системой перемещения источника УЗ стимуляции по координатам X и Y , а также объекта контроля по координате Z . Следует отметить, что в реализации ТНК термоакустическим способом существенное влияние на результаты испытаний оказывает качество контакта волновода УЗ излучателя с поверхностью объекта контроля. Ввиду этого, в разработанной установке реализован автоматизированный прижим и контроль усилия прижима, что обеспечивает повторяемость ТНК.

На рисунке 6.13 приведены результаты термоакустического контроля ударных повреждений в углерод-углеродной пластине толщиной 9 мм, полученные при вводе УЗ колебаний в одну и ту же точку поочередно с использованием излучателей, работающих на частоте 22; 44 и 60 кГц. Результаты иллюстрируют площадь рабочей области термоакустического контроля, определяемые зоной распространения колебаний в теле объекта контроля, а также демонстрируют влияние частоты вводимых УЗ колебаний на выявляемость дефектов (по параметру отношение сигнал/шум S).

В частности, на рисунке 6.13 показано, что с ростом частоты УЗ колебаний уровень отношения сигнал/шум S , для выбранного при анализе конкретного дефекта уменьшается. Однако, ранее было установлено, что определенные дефекты характеризуются собственными резонансными частотами, поэтому при совпадении рабочей частоты УЗ излучателя с резонансными частотами дефектов генерируется наибольший температурный сигнал. Следует отметить, что исследования в области термоакустического контроля представляют собой одно из приоритетных направлений научной группы В.П. Вавилова (ТПУ, г. Томск).



а) термограмма при УЗ стимуляции с частотой 22 кГц (5-я секунда ТНК) б) термограмма при УЗ стимуляции с частотой 44 кГц (5-я секунда ТНК) в) термограмма при УЗ стимуляции с частотой 60 кГц (5-я секунда ТНК)



а) график отношения
сигнал/шум S в зоне
дефекта при УЗ
стимуляции на частоте
22 кГц



б) график отношения
сигнал/шум S в зоне
дефекта при УЗ
стимуляции на частоте
44 кГц



в) график отношения
сигнал/шум S в зоне
дефекта при УЗ
стимуляции на частоте
60 кГц

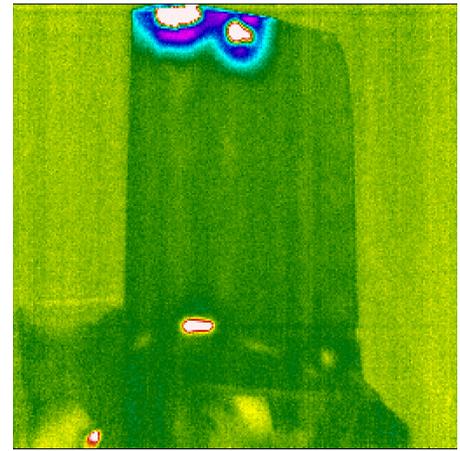
Рисунок 6.13 – Результаты термоакустического контроля пластины из углерод-углеродного композита, содержащей ударные повреждения

Большая часть исследований в области термоакустического способа ТНК относится к контролю качества лопаток турбин и лопаток вентилятора газотурбинных двигателей. Речь идет об обнаружении трещин в лопатках, изготовленных из металлических сплавов, в том числе имеющих жаропрочное покрытие, а также лопаток, изготовленных из ПКМ [263].

Для промышленного применения термоакустического способа ТНК в ТПУ (г. Томск) были разработаны стационарная и портативная установки, обеспечивающие обнаружение трещин в лопатках турбин из жаропрочного никелевого сплава, как с жаропрочным керамическим покрытием, так и без него (см. рисунок 6.14).



а) внешний вид установок термоакустического контроля



б) карта дефектов лопатки турбины с выявленными трещинами

Рисунок 6.14 – Стационарная и портативная установки термоакустического контроля лопаток турбин и результат термоакустического контроля

В таблице 6.7 приведены основные технические характеристики установки термоакустического ТНК лопаток турбин.

Таблица 6.7 - Технические характеристики установки термоакустического контроля

Состав установки	Ультразвуковой источник стимуляции, тепловизор, оснастка/транспортный кейс, компьютер
Обнаруживаемые дефекты	Трещины с малым или нулевым раскрытием, в том числе, внутренние расслоения, инородные включения
Тип контролируемых объектов	Металлические лопатки турбин, в том числе изготовленные методом аддитивных технологий с жаропрочным покрытием и без него
Глубины залегания выявляемых дефектов, мм	4

Продолжение таблицы 6.7	
Минимальный размер вертикально ориентированной трещины, мкм	1×100×200
Площадь зоны одновременного контроля, м ²	0,04
Производительность сплошного контроля, м ² в час	до 1,6
Длительность одного цикла контроля, с	до 100
Масса установки, кг	6
Габаритные размеры стационарной установки, м	1,2×0,55×0,7
Потребляемая мощность, кВт	2

6.6 Роботизированные установки комплексного НК

Современные тенденции развития НК, помимо автоматизации процедуры испытаний и обработки данных, в том числе для выполнения предиктивного анализа, включают комбинирование нескольких видов НК в составе одной системы [264-269]. Такой подход обеспечивает использование преимуществ каждого из методов, повышает вероятность и достоверность обнаружения внутренних дефектов [147, 214, 218, 220, 268]. В ТПУ (г. Томск) работы по комбинированию ТНК с другими видами неразрушающих испытаний проводят с 2020 года [223], для

этого был разработан программный модуль Thermo_Visual [269]. В частности, для обеспечения контроля качества цилиндрических сосудов для хранения водорода была разработана роботизированная установка комбинированного НК (см. рисунок 6.15) [270]. Установка предназначена для последовательного проведения ТНК способом тепловизионного сканирования и классического УЗ НК цилиндрических баллонов диаметром до 400 мм с целью обнаружения расслоений в композитной «рубашке» баллона, а также ее отслоения от металлического лайнера. В установке использованы два роботизированных манипулятора, на одном из которых установлен УЗ преобразователь с локальным иммерсионным контактом, а на втором размещен оптический источник нагрева и тепловизор. В процессе контроля цилиндрическое изделие вращают с равномерной скоростью, а роботизированные манипуляторы перемещают средства контроля вдоль его продольной оси для сканирования выбранных областей. Для контроля очередной кольцевой области первым начинают ТНК, после чего эту же кольцевую область контролируют с помощью УЗ НК. Такая очередность обусловлена неминуемым увлажнением контролируемой поверхности в процессе УЗ НК, что негативно влияет на результаты ТНК.

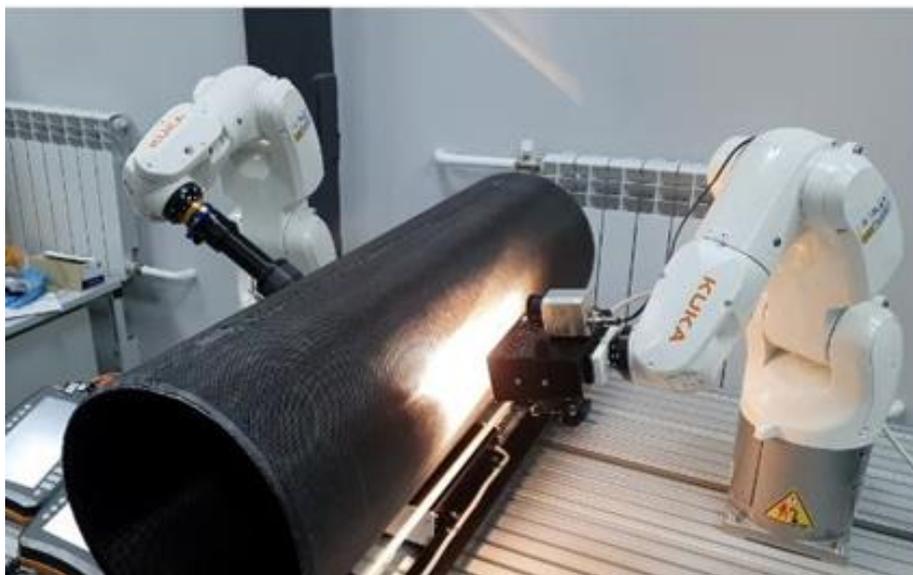


Рисунок 6.15 – Комбинированный ТНК и УЗ НК заготовки баллона для хранения водорода с использованием роботизированной установки

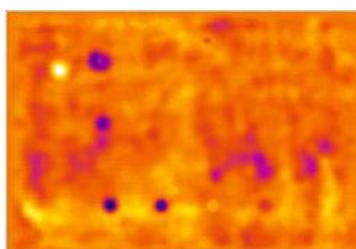
Технические характеристики роботизированной установки комбинированного НК приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 - Обобщенные технические характеристики роботизированной установки комбинированного контроля

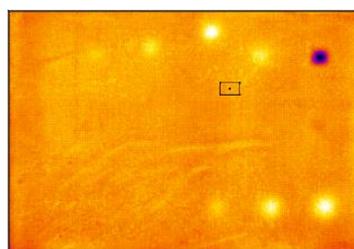
Состав установки	Два роботизированных манипулятора, оптический источник нагрева, тепловизор, контактный УЗ преобразователь
Обнаруживаемые дефекты	Внутренние расслоения, инородные включения, пористость, неравномерность толщины
Тип контролируемых объектов	Цилиндрические изделия из ПКМ, многослойные конструкции типа композит-металл
Глубины залегания выявляемых дефектов, мм	до 20
Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	0,5×0,5
Производительность сплошного контроля, м ² /ч	до 1,2
Габариты установки, м	2,1×1,8×1,6
Потребляемая мощность, кВт	4

Пример результатов комбинированного НК, полученных с использованием каждого из методов, приведен на рисунке 6.16. Идея комбинирования именно УЗ НК и ТНК обусловлена широким применением УЗ НК для оценки качества изделий из ПКМ, используемых в авиационной технике, односторонним принципом проведения испытаний, возможностью проведения НК непрерывным сканирующим способом, а также получением близких пространственных форматов получаемых результатов. С точки зрения дефектоскопии, основной причиной такой

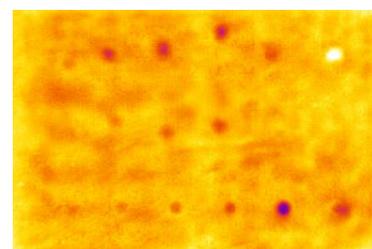
комбинации является необходимость перекрытия так называемой «слепой зоны», характерной для УЗ НК, в которую попадают приповерхностные дефекты, преимущественно выявляемые методом ТНК. В частности, на рисунке 6.16 видно, что результаты УЗ НК информативны для глубоких дефектов, а ТНК позволил обнаружить приповерхностные расслоения в композитной пластине, нанесенной на металлическое основание (для исследования эффективности комбинированного НК был использован контрольный образец №24). Комбинация результатов представляет собой результирующую карту дефектов с повышенной достоверностью их обнаружения.



а) результат УЗ НК, срез
для глубины 4-5 мм



б) результат ТНК,
термограмма для 80-й
секунды контроля



в) синтезированная
карта дефектов

Рисунок 6.16 – Результаты комбинированного НК контрольного образца №24 с различными типами внутренних дефектов

Следует отметить, что реализация комплексного НК требует специфической «подгонки» получаемых отдельными видами контроля результатов с точки зрения размеров изображений, уровней амплитуды сигналов, а также требует сопоставления типов и количества изображений, соответствующих распределению данных по глубине и по времени. Например, для ТНК каждое изображение последовательности представляет собой тепловую картину объекта контроля для конкретного момента времени, а каждое изображение, полученное с помощью УЗ НК, содержит амплитуды эхо-сигнала для конкретной глубины относительно контролируемой поверхности.

6.7 Выводы по Главе 6

Ввиду растущего интереса к ТНК со стороны промышленности, разработанные устройства создают необходимую базу для дальнейшего развития теплового вида НК и его применения на промышленных предприятиях. Описанные выше портативные дефектоскопы, стационарные и роботизированные системы представляют собой функционирующие опытные образцы, часть из которых были разработаны для решения конкретных практических задач дефектоскопии и дефектометрии изделий из ПКМ и металлов, в том числе, с покрытиями, в интересах конкретных промышленных заказчиков. Следует отметить, что следующим этапом научных исследований и разработок будет создание усовершенствованных портативных и самодвижущихся тепловых дефектоскопов, которые, с точки зрения универсальности, завершенности конструкции и программного обеспечения, будут пригодными для решения широкого спектра задач по повышению качества и надежности высокотехнологичных образцов техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе описаны основные результаты многолетних разработок методов, портативных и стационарных устройств ТНК различных материалов и изделий, включая программные алгоритмы дефектоскопии и дефектометрии, полученные Соискателем в Томском политехническом университете. Существенной особенностью диссертации, с точки зрения развития видов НК в целом, является ее практическая ориентированность, что подтверждается выполнением договоров с промышленными предприятиями передовых отраслей промышленности с соответствующим экономическим и социальным эффектом. В диссертационной работе соблюден принцип последовательности и комплексности исследований, включая теоретический анализ и практическое внедрение результатов. Разработки в области математических алгоритмов и программных модулей для обработки экспериментальных данных позволили существенно повысить производительность и повторяемость процедур тепловой дефектоскопии и дефектометрии. В части приборостроения разработаны оригинальные устройства, реализующие новые способы ТНК, которые обеспечивают высокую производительность испытаний изделий из композиционных материалов и многослойных структур.

Основные результаты работы - следующие.

Разработаны способ ТНК, основанный на применении принудительного охлаждения, и соответствующая методика ТНК, обеспечивающие обнаружение структурных неоднородностей в изделиях из ПКМ, поверхность которых характеризуется контрастом шума более 5 %, а также способ ТНК материалов, полупрозрачных в видимом диапазоне спектра излучения, основанный на использовании равномерно перемещающегося источника конвективного нагрева.

Разработана методика анализа температурных данных для автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии, а также классификации дефектов по типам с помощью алгоритмов на базе ИНС. Разработан соответствующий программный модуль.

Разработаны способ и соответствующая методика комбинированного ТНК, обеспечивающие обнаружение характерных для ПКМ дефектов, а именно, ударных повреждений, трещин и расслоений, в течение одной процедуры контроля.

Разработаны способ и соответствующая методика ТНК крупногабаритных изделий плоской и цилиндрической формы, изготовленных из монолитных ПКМ и многослойных структур типа металл-теплозащита, обеспечивающие производительность контроля до 25 м² в час.

Разработаны портативные и стационарные, в том числе роботизированные устройства ТНК изделий из ПКМ, металла, сотовых и многослойных структур типа металл-теплозащита, имеющих различные геометрические формы и габаритные размеры, пригодные для применения в лабораторных условиях и производственных помещениях.

Предложенные способы и методики, формирующие новые методы ТНК, в совокупности с разработанной аппаратурой, способствуют развитию и внедрению теплового вида неразрушающих испытаний, который, с учетом современных тенденций внедрения многослойных материалов и сложных структур, приобретает широкие перспективы применения на отечественных предприятиях авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности.

Таким образом, Соискатель полагает, что выполненные диссертационные исследования вносят существенный вклад в решение крупной научной проблемы неразрушающего контроля качества современных многослойных материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники, имеющей важное хозяйственное значение и связанной с разработкой новых, научно обоснованных технологических решений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Приведены статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, относящихся к 1-му и 2-му квартилям.

1 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Shiryaev V.V., Kuimova M.V., Zhang H. Noise suppression in pulsed IR thermographic NDT: Efficiency of data processing algorithms // NDT and E International. – 2024. –V. 148. –P.103240. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103240 (Q1).

2 Chulkov A., Moskovchenko A., Vavilov V. Enhancing generalizability of a machine learning model for infrared thermographic defect detection by using 3d numerical modeling // Frattura ed Integrita Strutturale. –2024. –V. 18. –P. 177–191. DOI:10.3221/IGF-ESIS.70.10 (Q2).

3 Vavilov V., Chulkov A., Shiryaev V., Kladov D. A novel reference-free technique for processing one-sided thermal NDT results in the time domain // NDT & E International. – 2024. – T. 143. – C. 103032 (Q1).

4 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Kladov D.Y. Principle, equipment and applications of line-scanning infrared thermographic NDT // Journal of nondestructive evaluation. – 2023. DOI: 10.1007/s10921-023-01001-4 (Q2).

5 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Shagdyrov B., Kladov D. Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2023. DOI:10.1007/s10921-023-00929-x (Q2).

6 Chulkov A., Vavilov V., Nesteruk D., Burleigh D., Moskovchenko A. A method and apparatus for characterizing defects in large flat composite structures by Line Scan Thermography and neural network techniques // Frattura ed Integrita Strutturale, – 2023. – 17. – P. 110–121 (Q2).

7 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Smotrova S.A., Smotrov A.V., Scherbakov V.N., Storozhenko V.A. Infrared thermographic analysis of thermal property variations in composites subjected to impact damage, thermal cycling and moisture saturation // Composite Structures. – 2022. – T. 296. – P. 115927 (Q1).

8 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Shiryaev V.V. Practical limits of pulsed thermal NDT: The concept of additive/multiplicative noise // *NDT & E International*. – 2022. – T. 130. – P. 102677 (Q1).

9 Moskovchenko A., Švantner M., Vavilov V., Chulkov A. Analyzing probability of detection as a function of defect size and depth in pulsed IR thermography // *NDT & E International*. – 2022. – T. 130. – P. 102673 (Q1).

10 Nesteruk D., Vavilov V., Chulkov A., Burleigh D. Simple and robust methodology of defect thermal characterization based on thermal quadrupoles and polynomial approximation // *NDT and E International*. – 2021. – V. 124. – P. 102522 (Q1).

11 Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., OswaldTranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V. The detection and characterization of defects in metal/nonmetal sandwich structures by thermal NDT, and the comparison of areal heating and scanned linear heating by optical and inductive methods // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2021. DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y (Q2).

12 Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Shagdyrov B., 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. – V. 114. – P. 103675 (Q2).

13 Moskovchenko A.I., Švantner M., Vavilov V.P., Chulkov A.O. Characterizing depth of defects with low size/depth aspect ratio and low thermal reflection by using pulsed IR thermography // *Materials*. – 2021. – T. 14. – № 8 (Q2).

14 Vavilov V., Chulkov A., Dubinskii S., Derusova D., Zhvyrblia V. Nondestructive testing of composite T-Joints by TNDT and other methods // *Polymer Testing*. – 2021. – V. 94. – P. 107012 (Q1).

15 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Sommier A., Pradere C., Siddiqui A., Prasad Y.L. Analyzing efficiency of optical and THz infrared thermography in nondestructive testing of GFRP by using the Tanimoto Criterion // *NDT & E International*. – 2022. DOI:10.1016/j.ndteint.2020.102383 (Q1).

16 Moskovchenko A.I., Vavilov V.P., Chulkov A.O., Bernegger R., Maierhofer C. Detecting delaminations in semitransparent glass fiber composite by using pulsed infrared thermography // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2020. – T. 39. – № 3. – P. 69 (Q2).

17 López F., Sfarra S., Chulkov A., Vavilov V., Ibarra-Castanedo C., Zhang H., Maldague X.P.V., Omar M.A. Thermal stresses applied on helicopter blades useful to retrieve defects by means of infrared thermography and speckle patterns // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – T. 18. – P. 100511 (Q1).

18 Moskovchenko A.I., Vavilov V.P., Chulkov A.O. Comparing the efficiency of defect depth characterization algorithms in the inspection of CFRP by using one-sided pulsed thermal NDT // *Infrared Physics & Technology*. – 2020. – T. 107. – P. 103289 (Q2).

19 Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., Saeed N., Omar M. Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating defect depth in infrared thermographic nondestructive testing // *Infrared Physics and Technology*. – 2019. DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103047 (Q2).

20 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Sfarra S., Zhang H., Maldague X.P.V., Osman A., Szielasko K., Stumm C., Sarasini F., Fiorelli J. Evaluating thermal properties of sugarcane bagasse-based composites by using active infrared thermography and terahertz imaging // *Infrared Physics & Technology*. – 2019. – T. 97. – P. 432-439 (Q2).

21 Vavilov V., Chulkov A., Moskovchenko A., Smotrov A., Smotrova S. Characterizing impact damage in gfrp/cfrp composites by determining thermal effusivity/diffusivity // *Measurement Science and Technology*. – 2019. – T. 30. – № 3. – P. 034003 (Q1).

22 Vavilov V.P., Marinetti S., Chulkov A.O., Pan Y. Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: Qualitative and quantitative aspects // *Polymer Testing*. – 2016. – V. 54. – P. 270-280. DOI:10.1016/j.polymertesting.2016.07.023 (Q1).

23 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A., Pan Y. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. – 2016. – V.13. – P.128-143. DOI:10.1080/17686733.2015.1131855 (Q2).

24 Romano M., Chulkov A.O., Sommier A., Balagas D., Vavilov V.P., Pradere C., Batsale J-C. Broadband Sub-terahertz Camera Based on Photothermal Conversion and IR Thermography // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2016. – V.37. – P. 448-461. DOI:10.1007/s10762-015-0241-x (Q1).

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

1 Сканирующий тепловизионный дефектоскоп: пат. №2786045 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/60 / Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 16.12.2022. Бюл. 35.

2 Способ теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий: пат. №2774040 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/00 / Вавилов В.П., Чулков А.О., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Шильников Г.В., Щепелин В.Я., Перепелица А.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 14.06.2022. Бюл. 17.

3 Устройство для теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий: пат. №2697437 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Нестерук Д.А., Чулков А.О., Шильников Г.В., Щепелин В.Я., Перепелица А.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 14.08.2019. Бюл. 23.

4 Тепловой дефектоскоп: пат. №2696933С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/00, G01J 5/60 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 07.08.2019. Бюл. 22.

5 Устройство для бесконтактного определения коэффициента температуропроводности твердых тел: пат. №2549549. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/18, G01J 5/60 / Вавилов В.П., Чулков А.О., Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 27.04.2015. Бюл. № 12.

6 Тепловой дефектоскоп: пат. №144096U1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.08.2014г. Бюл. № 22.

7 Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля цилиндрических металлических изделий: пат. №142185 U1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00 / Вавилов В.П., Чулков А.О., Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 20.06.2014. Бюл. 17.

8 Тепловизионная дефектоскопическая система: пат. №2599919С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 20.10.2016 г. Бюл. № 29.

9 Способ бесконтактного одностороннего активного теплового неразрушающего контроля: пат. №2590347. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.07.2016. Бюл. № 19.

10 Тепловизионная система для проведения наружной тепловизионной съемки: пат. №2575798 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О., Лариошина И.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 20.02.2016 г. Бюл. № 5.

11 Тепловизионный дефектоскоп: пат. №2580411С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00, G01J 5/60 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О., Нестерук Д.А. патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.04.2016. Бюл. 10.

12 Автоматизированная идентификация дефектов в инфракрасных термограммах: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018615349. Российская федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 07.05.2018. Бюл. № 5.

13 Расчет температурных полей в анизотропных телах с внутренними источниками тепловыделения: свидетельство о государственной регистрации

программ для ЭВМ №2018615919. Российская федерация / Суханов М.С., Симонова О.С., Вавилов В.П., Чулков А.О.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 18.05.2018. Бюл. № 5.

14 Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020612786. Российская федерация / Шпильной В.Ю., Дерусова Д.А., Чулков А.О.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 03.03.2020. Бюл. № 3.

15 Thermo_NN: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020619186. Российская федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 13.08.2020. Бюл. № 8.

16 ThermoSon: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020619856. Российская Федерация / Суханов М.С., Вавилов В.П., Чулков А.О., Дерусова Д.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 25.08.2020. Бюл. № 9.

17 ThermoScan: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021664038. Российская Федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.; патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 30.08.2021. Бюл. № 9.

18 ThermoFusion: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021663926. Российская Федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 26.08.2021. Бюл. № 9.

19 Thermo_Visual: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022662013. Российская Федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 29.06.2022. Бюл. № 7.

20 ThermoCalc_HC: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022662003. Российская Федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А.,

Вавилов В.П., Суханов М.С.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 29.06.2022. Бюл. № 7.

21 ThermoWaves_NDT: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2023660384. Российская Федерация / Ширяев В. В., Чулков А.О., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 19.05.2023. Бюл. № 5.

22 ThermoCalc 3D Pro: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023688527. Российская Федерация / Вавилов В.П., Суханов М.С. Чулков А.О.; патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 22.12.2023. Бюл. № 1.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ГУ – граничные условия

ИК – инфракрасный

ИНС – искусственная нейронная сеть

МАГК – метод анализа главных компонент

МТОС – метод термографической обработки сигнала

НК – неразрушающий контроль

ПКМ – полимерный композиционный материал

РК – радиационный метод контроля

ТНК – тепловой неразрушающий контроль

ТФХ – теплофизические характеристики

УЗ – ультразвуковой

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2015. – 545 с.
- 2 Vavilov V.P., Burleigh D.D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing // NDT & E. International. – 2015. DOI:10.1016/j.ndteint.2015.03.003.
- 3 Vavilov V.P., Burleigh D.D. Infrared thermography and thermal nondestructive testing. N.Y.: Springer Nature, 2019. – 595 p.
- 4 Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) // Дефектоскопия. – 2023. DOI: 10.31857/S0130308223060040.
- 5 Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Тепловой контроль. – М.: Спектр, 2011. – 176 с.
- 6 Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В. Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М.: Наука, 2002. – 476 с.
- 7 Московченко А.И. Разработка алгоритмов тепловой дефектометрии металлических покрытий и композиционных материалов с различной оптической прозрачностью: дис. канд. техн. наук: 2.2.8. / Московченко Алексей Игоревич. – Томск, 2022. – 118 с.
- 8 Шагдыров Б.И. Разработка алгоритмов и методик автоматизированной тепловой дефектоскопии и дефектометрии композиционных материалов: дис. канд. техн. наук: 2.2.8 / Шагдыров Батор Ильич. – Томск, 2023. – 104 с.
- 9 Herschel W. Experiments on the refrangibility of the visible rays of the sun // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1800. DOI:10.1098/rstl.1800.0015.
- 10 Fourier J. Theory du mouvement de la chaleur dans les corps solides, 1er partie // Memoires de l'Academie des Sciences. – 1824. –V. 4. – P. 185-555.
- 11 Angstrom M.A.J. New method of determining the thermal conductivity of bodies // Phil. Mag. – 1863. – N. 25. – P. 130-142.

- 12 Bellingham L. Means for detecting the presence at a distance of icebergs, steamships, and other cool or hot objects // US Patent. 1915. 158. 967.
- 13 Parker R. D. Thermic balance or radiometer // US patent. 1914. 099. 199.
- 14 Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М.: Мир, 1972. – 530 с.
- 15 Carlo C. Infrared: A Key Technology for Security Systems // Advances in Optical Technologies. – 2012. DOI:10.1155/2012/838752.
- 16 Vernotte P. Mesure de la conductibilite thermique des isolants. methode de touthau // Chaleur et industrie. – 1937. – P. 331-337.
- 17 Nondestructive Testing Handbook «Infrared and Thermal Testing». – A.S.N.T.: U.S.A. – 2001. – 714 p.
- 18 Beller W.S. Navy sees promise in infrared thermography for solid case checking // Missiles Rockets. – 1965. – P. 1234–1241.
- 19 Green D.R. Principles and applications of emittance-independent infrared nondestructive testing. // Applied Optics. – 1968. – P. 1796-1805.
- 20 Carslow H.S., Jaeger T.S. Conduction of heat in solids // Oxford Univ. Press. Oxford. U.K. – 1959. – P. 580.
- 21 Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 604 с.
- 22 Balageas D.L., Krapez J.-C, Cielo P. Pulsed photo-thermal modeling of layered materials // Journal of Applied Physics. – 1986. – P. 348-357.
- 23 Vavilov V., Taylor R. Theoretical and practical aspects of the thermal NDT of bonded structures // "Res. Techn.in NDT". – 1982. – P. 239-280.
- 24 MacLaughlin P.V., Mirchandani H.G. Aerostructure NDT evaluation by thermal field detection (Phase II) // Final Rep. AIRTASK. Naval Air System Command AIR-310G. Washington D.C. U.S.A. – 1984. – P. 198.
- 25 Попов Ю.А., Карпельсон А.Е., Строков В.А. Тепловой контроль качества многослойных изделий // Дефектоскопия. – 1976. – С. 76-81.
- 26 Motzer W.P., Boyd E.T., Lee S., Lilienthal D.A. Non-destructive test systems with infrared thermography assemblies and ultrasonic test assemblies, and associated methods // US Patent. 11639914B2.

27 Долматов Д.О., Чулков А.О., Нестерук Д.А., Кашкаров Е.Б., Вавилов В.П. Синтез результатов акустического и теплового контроля металлополимерных композитных материалов // Дефектоскопия. – 2024. – № 11. – С. 56-65.

28 Loganathan T.M, MTH S., Muhammad Amir SM, Jamil J., Yusof MR., Shah M. Infrared Thermographic and Ultrasonic Inspection of Randomly-Oriented Short-Natural Fiber-Reinforced Polymeric Composites // Frontiers in Materials. – 2021. DOI:10.3389/fmats.2020.604459.

29 Fournier R., Shum A.D., Liu J., Sabarirajan D.C., Xiao X., Zenyuk I. Combined infrared thermography, X-ray radiography, and computed tomography for ink drying studies // ACS Applied Energy Materials. – 2018. DOI:10.1021/acsaem.8b01147.

30 Cramer E., Winfree W., Hodges K.L., Koshti A. Status of thermal NDT of space shuttle materials at NASA // Proc. SPIE. – 2006. DOI:10.1117/12.669684.

31 Zalameda J., Winfree W., Cramer E., Juarez P. Composite Thermal Nondestructive Evaluation Research at NASA Langley // Proc. Quantitative InfraRed Thermographapy. – 2019. DOI:10.21611/qirt.2019.a.

32 Shepard S. Temporal noise reduction, compression and analysis of thermographic image data sequences // U.S. Patent No. 6516084.

33 Siegel J., Beemer M., Shepard S. Automated non-destructive inspection of Fused Filament Fabrication components using Thermographic Signal Reconstruction // Additive Manufacturing. – 2019. DOI:10.1016/j.addma.2019.100923.

34 Shepard S. Thermal Nondestructive Evaluation of Composite Materials and Structures // Book Chapter. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2017. DOI:10.1016/B978-0-12-803581-8.10038-4.

35 Obeidat O., Yu O., Favro L., Han X. The Effect of Heating Duration on the Quantitative Estimation of Defect Depth Using Sonic Infrared Imaging // Engineering, Materials Science. – 2021. DOI:10.1115/1.4050353.

36 Yu O., Obeidat O., Han X. Studying Relationships of Dependency Energy Consumption on Transducer Tip Size and Crack Length in Sonic Infrared Imaging // Engineering, Physics. – 2021. DOI:10.1115/1.0002316v.

37 Holland S.D., Schiefelbein B. Model-based Inversion for Flash Thermography // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2016. <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/61846>.

38 Sun J.G. Quantitative Three-Dimensional Imaging of Heterogeneous Materials by Thermal Tomography // Journal of Heat Transfer-transactions of The Asme. – 2016. DOI:10.1115/1.4033998.

39 Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing // Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. John Wiley & Sons. New York. U.S.A. – 2001. P. 682.

40 Fleuret J., Ebrahimi S., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Latent low rank representation applied to pulsed thermography data for carbon fibre reinforced polymer inspection // Quantitative infrared thermography journal. – 2022. DOI:10.1080/17686733.2022.2047301.

41 Gavrilov D., Maev R. Extraction of Independent Structural Images for Principal Component Thermography // Applied Sciences. – 2018. DOI:10.3390/app8030459.

42 Mohr G., Nowakowski S., Altenburg S., Maierhofer C., Hilgenberg K. Experimental determination of the emissivity of powder layers and bulk material in laser powder bed fusion using infrared thermography and thermocouples // Metals. – 2020. DOI:10.3390/met10111546.

43 Rittmann J., Kreutzbruck M. Lateral heat flux reduction using a lock-in thermography compensation method // Scientific Reports. – 2023. DOI:10.1038/s41598-023-44128-0.

44 Roche J.-M., Balageas D.L. Common tools for quantitative time-resolved pulsed and step-heating thermography- part 1: theoretical basis // Quantitative Infrared Thermography Journal. – 2014. – V. 11. – P. 43-56.

45 Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V.P., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G.M. Thermal (IR) and Other NDT techniques for improved material inspection // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2016. DOI:10.1007/s10921-015-0331-7.

46 Ryu M., Batsale J.-C., Morikawa J. Modelling of dual lock-in method for the simultaneous measurements of thermal diffusivity and thermal effusivity // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120337.

47 Batsale J.-C . Saxena A., Raman V., Ng E.Y.K. Study on methods to extract high contrast image in active dynamic thermography. Quantitative Infrared Thermography Journal. – 2019. DOI: 10.1080/17686733.2019.1586376.

48 Toullier T., Dumoulin J., Mevel L. A Kriging-based Interacting Particle Kalman Filter for the simultaneous estimation of temperature and emissivity in Infrared imaging // IFAC-Papers. – 2020. DOI:10.1016/j.ifacol.2020.12.219.

49 Alhammad M., Avdelidis N.P., Ibarra-Castanedo C., Torbali M.E., Genest M., Zhang H., Zolotas A., Maldgue X.P. Automated impact damage detection technique for composites based on thermographic image processing and machine learning classification // Sensors. – 2022. DOI:10.3390/s22239031.

50 Almond D.P., Angioni S., Pickering S.D. A case for NDT expert systems based on the development of the Thermographic NDE Advisory and Guidance System // Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. – 2017. DOI: 10.1784/insi.2017.59.9.473.

51 Tuschl C., Oswald-Tranta B., Eck S. Scanning inductive thermographic surface defect inspection of long flat or curved work-pieces using rectification targets // Applied Sciences. – 2022. DOI:10.3390/app12125851.

52 Mayr G., Plank B., Gruber J., Sekelja J., Hendorfer G. Quantitative evaluation of the effective thermal diffusivity for model-based porosity prediction in CFRP // Quantitative Infrared Thermography Journal. – 2016. DOI: 10.1080/17686733.2015.1093310.

53 Panella F.W., Pirinu A. Application of pulsed thermography and post-processing techniques for cfrp industrial components // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2021. DOI: 10.1007/s10921-021-00776-8.

54 Cernuschi F., Bison P. Thirty years of thermal barrier coatings (TBC). Photothermal and thermographic Techniques: Best practices and lessons learned // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. DOI:10.1007/s11666-022-01344-w.

55 Meola C., Carlomagno G.M., Squillace A., Vitiello A. Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography // Measurement Science and Technology. – 2006. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2005.02.007.

56 D'Accardi E., Palumbo D., Tamborrino R., Cavallo P., Galietti U. Pulsed Thermography: evaluation and quantitative analysis of defects through different post-processing algorithms // Proc. Quantitative Infrared Thermography. – 2018. DOI:10.21611/qirt.2018.048.

57 Wang F., Jiang Z., Liu Y., Ibarra-Castanedo C., Zhang H., Cao K., Maldague X., Sfarra S., Yao Y. Enhancing defect detection in active infrared thermography using adaptive background suppression techniques // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2024. DOI:10.1007/s10973-024-13668-6.

58 Salazar A., Sagarduy-Marcos D., Rodríguez-Aseguinolaza J., Mendioroz A., Ciria J.C., Celorrio R. Resolution of multiple semi-infinite delaminations using lock-in infrared thermography // NDT & E International. – 2024. DOI:10.1016/j.ndteint.2024.103156.

59 Venegas P., Peran J., Usamentiaga R., Ocariz I.S. NDT inspection of aeronautical components by projected thermal diffusivity analysis // Proc. 14th International Conference on Quantitative Infrared Thermography. – 2018. DOI:10.21611/qirt.2018.044.

60 Antolis C., Rajic N. Optical Lock-in Thermography for Structural Health Monitoring – A Study into Infrared Detector Performance // Procedia Engineering. – 2017. DOI:10.1016/j.proeng.2017.04.510.

61 Wei Z., Fernandes H., Herrmann H.-G., Tarpani J., Osman A. A deep learning method for the impact damage segmentation of curve-shaped CFRP specimens inspected by Infrared Thermography // Sensors. – 2021. DOI:10.3390/s21020395.

62 Hillen M., Sels S., Ribbens B., Verspeek S., Janssens K., Van der Snickt G., Steenackers G. Qualitative comparison of Lock-in Thermography (LIT) and Pulse Phase

Thermography (PPT) in mid-wave and long-wave infrared for the inspection of paintings // *Applied Sciences*. – 2023. DOI:10.3390/app13074094.

63 Ibarra-Castanedo C., Servais P., Klein M., Boulanger T., Kinard A., Hoffait S., Maldague X. Detection and characterization of artificial porosity and impact damage in aerospace carbon fiber composites by pulsed and line scan thermography // *Applied Sciences*. – 2023. DOI:10.3390/app13106135.

64 Świdorski W. IR Thermography nondestructive testing methods of composite materials used in aerospace applications // *Proc. Quantitative Infrared Thermography*. – 2015. DOI:10.21611/qirt.2015.0016.

65 Nowakowski A. Problems of Active Dynamic Thermography Measurement Standardization in Medicine // *Pomiary Automatyka Robotyka*. – 2021. DOI:10.14313/PAR_241/51.

66 Grys S., Minkina W. Noninvasive Methods of Active Thermographic Investigation: Short Overview of Theoretical Foundations with an Example of Application // *Energies*. – 2022. DOI:10.3390/en15134865.

67 Gliscinska E., Michalak M., Krucinska I., Strakowska M., Kopec M., Wiecek B. A new thermographic method for determining the thickness of the polymer surface layer in sound-absorbing fibrous composite materials // *Polymer Testing*. – 2022. DOI:10.1016/j.polymertesting.2022.107748.

68 Švantner M., Muzika L., Moskovchenko A., Pereira C.M.C. Repeatability study of flash-pulse thermographic inspection of carbon-fiber composite samples // *Infrared Physics & Technology*. – 2022. DOI:10.1016/j.infrared.2022.104350.

69 Sfarra S., Gargiulo G., Omar M. Learning Thermographic Models for Optimal Image Processing of Decorated Surfaces // *Engineering Proceedings*. – 2021. DOI:10.3390/engproc2021008013.

70 Kaur K., Mulaveesala M. An efficient data processing approach for frequency modulated thermal wave imaging for inspection of steel material // *Infrared Physics & Technology*. – 2019. DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103083.

71 Uchida Y., Shiozawa D., Hori M., Kobayashi K., Sakagami T. Advanced technique for thermoelastic stress analysis and dissipation energy evaluation via visible-

infrared synchronous measurement // *Experimental Mechanics*. – 2022. DOI:10.1007/s11340-021-00796-5.

72 Ryu M., Batsale J.-C., Morikawa J. Modelling of dual lock-in method for the simultaneous measurements of thermal diffusivity and thermal effusivity // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120337.

73 Ranjit S., Choi M., Kim W. Thermographic inspection of water ingress in composite honeycomb sandwich structure: a quantitative comparison among Lock-in thermography algorithms // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. – 2019. DOI:10.1080/17686733.2019.1697848.

74 Guo Xingwang. Ultrasonic Infrared Thermography of Aluminium Thin Plates for Crack Inspection in Friction Stir Welded Joints // *Sensors Journal*. – 2020. DOI:10.1109/JSEN.2020.2976144.

75 Zhu P., Zhang H., Sfarra S., Sarasini F., Usamentiaga R., Vavilov V., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Enhancing resistance to low-velocity impact of electrospun-manufactured interlayer-strengthened CFRP by using infrared thermography // *NDT & E International*. – 2024. DOI:10.1016/j.ndteint.2024.103083.

76 Chulkov A., Vavilov V., Shagdyrov B., Kladov D., Burleigh D. Detecting defects in composites using combined heating/cooling: theory and experiments // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2024. DOI:10.1007/s10921-023-01042-9.

77 Vavilov V., Chulkov A., Shiryayev V., Kuimova M., Zhang H. Noise Suppression in IR Thermographic NDT efficiency of data processing algorithms. – 2024. DOI:10.2139/ssrn.4721231.

78 Vavilov V., Burleigh D.D., Chulkov A., Kladov D. Simulated delaminations in thermal NDT standards and the concept of thermally equivalent defects // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2024. DOI:10.2139/ssrn.4812534.

79 Способ теплового контроля композитных материалов: пат. №2616438С1. Российская Федерация: МПК51 G01N 25/72, G01N 22/02 / авторы и заявители Будадин О.Н., Кульков А.А. Козельская С.О.: патентообладатель Открытое акционерное общество Центральный научно-исследовательский институт

специального машиностроения. Дата подачи заявки: 23.05.2016. Дата регистрации 14.04.2017. Бюл. № 11.

80 Пономарев Д. Б., Захаренко В.А., Абрамова Е.В. Анализ погрешностей при пирометрических измерениях в производственных условиях // Омский научный вестник. – 2019. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-94-99.

81 Чернышев В.Н., Однолько В.Г., Чернышев А.В. Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий. – М.: Спектр. 2012. – 201 с.

82 Котовщиков И.О. Разработка методики активного теплового контроля вертолётных лопастей из композиционных материалов: дис. канд. техн. наук: 2.2.8 / Котовщиков Илья Олегович. – Санкт-Петербург. 2022. – 287 с.

83 Iziunova A. Vshivkov A., Sabirov R., Gachegova E., Plekhov O. Infrared thermography investigation of the mechanical and thermal properties of laser-shocked Ti64 // Proc. Quantitative Infrared Thermography. – 2023. DOI:10.21611/qirt.2023.18.

84 Студитский А.С. Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Студитский Александр Сергеевич. – Москва. 2013. – 113 с.

85 Valke A., Zakharenko V., Lobov D., Ponomarev D., Shkaev A., Nikolaev M., Lukuta S. Infrared monitoring of the metal surface temperature of superheater pipes in transient modes // Omsk Scientific Bulletin. – 2023. DOI:10.25206/1813-8225-2023-185-103-108.

86 Батов Г.П. Дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Неразрушающий контроль авиационной техники» (третий квалификационный уровень) // АУЦ «Качество». Москва. – 2019. 18 с.

87 Чернышев С.Л., Зиченков М.Ч., Голован В.И., Зайцева А.М., Казьмин Е.А., Ковалев И.Е., Корнилов А.Б., Корнилов Г.А., Смотров А.В., Чернявский А.А., Шустров А.О. Особенности теплового неразрушающего контроля ударных повреждений изделий из полимерных композиционных материалов // Дефектоскопия. – 2020. – №9. – С. 28-39.

88 Лукьянов А.В., Кошкин А.В. Тепловизионный контроль многослойных изделий методами динамической тепловой томографии на базе программы ThermoFit Pro // Вестник ИргУПС. – 2020. – Том 24. – Вып. 2. – С. 284-294.

89 Мойсейчик Е.А. Исследование и разработка метода теплового неразрушающего контроля стальных конструкций на основе механизма деформационного теплообразования: дис. д-ра. техн. наук: 05.11.13 / Мойсейчик Евгений Алексеевич. – Новосибирск, 2018. – 277 с.

90 Degiovanni A., Lamine A.-S., Houlbert A.-S., Maillet D. Identification of subsurface defects using a sensibility analysis // Proc. 4th European Conference on Composite Materials. Stuttgart. Germany. – 1990. – P. 691-695.

91 Krapez J.-C., Balageas D.L. Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography // Proc. Quantitative Infrared Thermography. Sorrento. Italy. – 1994. – P. 260-266.

92 Maldague X., Marinetti S. Pulse phase infrared thermography // Journal of Applied Physics. – 1996. – V. 79. – P. 2694-2698.

93 Galmiche F., Vallerand S., Maldague X. Wavelet transform applied to pulsed phase thermography // Proc. Workshop on Advances in Infrared Technology and Applications. – 1999. – P. 117-122.

94 Ibarra-Castanedo C., Gonzalez D., Galmiche F., Maldague X.P., Bendada A. Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data // Proc. SPIE «Thermosense-XXVIII». – 2006. – V. 6205. – P. 1-12.

95 Gonzales D., Ibarra-Castanedo C., Madruga F., Maldague X.P. Analysis of pulsed thermographic sequences based on Radon transform // Proc. SPIE «Thermosense-XXVIII». – 2006. – V. 6205. – P. 62051N-1-7.

96 Rajic N. Principal Component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures // Composite Structures. – 2002. DOI:10.1016/S0263-8223(02)00161-7.

97 Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Vavilov V. Non-destructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography // Research in NDE. – 1994. – V. 5 (4). – P. 257-271.

98 Wei Y., Ye Y., He H., Su Z. Multi-frequency fused lock-in thermography in detecting defects at different depths // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2022. DOI:10.1007/s10921-022-00889-8.

99 Mulaveesala R., Tuli S. Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection // *Applied Physics Letters*. – 2006. – V. 89.

100 Vavilov V.P., Shirayev V.V., Kuimova M.V. Time and phase domain thermal tomography of composites // *Photonics*. – 2018. DOI: 10.3390/photonics5040031.

101 Toivanen J.M., Tarvainen T., Huttunen J.M.J., Savolainen T., Orlande H.R.B., Kaipio J.P., Kolehmainen V. 3D thermal tomography with experimental measurement data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 78. – P. 1126-1134.

102 Ringermacher H.I., Howard D.R., Knight B. Thermal imaging NDT at General Electric // *Proc.18th WCNDT*. – 2012.

103 Wang H., Hsieh S.-J. Solving the inverse heat conduction problem in using long square pulse thermography to estimate coating thickness by using SVR models based on restored pseudo heat flux (RPHF) in plane profile // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2018. DOI: 10.1007/s 10921-018-0535-8.

104 Sakagami T., Izumi Y., Mori N., Kubo S. Development of self-reference lock-in thermography and its application to remote nondestructive inspection of fatigue cracks in steel bridges // *Quantitative Infrared Thermography Journal*. – 2010. – V. 7(1). – P. 73-84.

105 Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., Saeed N., Omar M. Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating defect depth in infrared thermographic nondestructive testing // *Infrared Physics and Technology*. – 2019. DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103047.

106 Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., OswaldTranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V. The detection and characterization of defects in metal/nonmetal sandwich structures by thermal NDT, and the comparison of areal heating and scanned linear heating by optical and inductive methods // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2021. DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y.

107 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Shagdyrov B., Kladov D. Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2023. DOI:10.1007/s10921-023-00929-x.

108 Fang Q., Ibarra-Castanedo C., Duan Y., Maldague X. Automatic Detection and Identification of Defects by Deep Learning Algorithms from Pulsed Thermography Data // *Sensors*. – 2023. DOI:10.3390/s23094444.

109 Torbali M., Alhammad M., Zolotas A., Avdelidis N., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Enhanced defect identification by image fusion of infrared thermography and ultrasonic phased array inspection techniques // *Proc. Thermosense: Thermal Infrared Applications XLV*. – 2023. DOI:10.1117/12.2659701.

110 Torbali M., Zolotas A., Avdelidis N., Alhammad M., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. A Complementary Fusion-Based Multimodal Non-Destructive Testing and Evaluation Using Phased-Array Ultrasonic and Pulsed Thermography on a Composite Structure // *Materials*. – 2024. DOI:10.3390/ma17143435.

111 Padiyar M., Zanotti Fragonara L., Petrunin I., Raposo J., Tsourdos A., Gray I., Farmaki S., Exarchos D., Matikas T., Dassios K. Fast, accurate, and reliable detection of damage in aircraft composites by advanced synergistic infrared thermography and phased array techniques // *Applied Sciences*. – 2021. DOI:10.3390/app11062778.

112 Liu G., Gao W., Liu W., Xu J., Li R., Bai W. LFM-Chirp-square pulse-compression thermography for debonding defects detection in honeycomb sandwich composites based on THD-processing technique // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – 2023.

113 Lu X., He Z., Su L., Fan M., Liu F., Liao G., Shi T. Detection of micro solder balls using active thermography technology and K-means algorithm // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2018.

114 Abdulrahman Y.A., Omar M.A., Said Z., Obeideli F., Abusafieh A., Sankaran G.N. A Taguchi design of experiment approach to pulse and pock-in thermography, applied to CFRP composites // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2017. DOI: 10.1007/s10921-017-0450-4.

115 Metz C., Franz P., Fischer C., Wachtendorf V., Maierhofer C. Active thermography for quality assurance of 3D-printed polymer structures // Proc. Quantitative Infrared Thermography. – 2018. DOI:10.3390/app12125851.

116 Douellou C., Balandraud X., Duc E., Verquin B., Lefebvre F., Sar F. Rapid characterization of the fatigue limit of additive-manufactured maraging steels using infrared measurements // Additive Manufacturing. 2020. DOI:10.1016/j.addma.2020.101310.

117 Szymanik B. An evaluation of 3D-printed materials structural properties using active infrared thermography and deep neural networks trained on the numerical data // Materials. – 2022. DOI:10.3390/ma15103727.

118 Chulkov A., Vavilov V., Kladoy D., Yurkina V. Thermal Nondestructive Testing of Composite and Metal Parts Manufactured by Additive Technologies // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2023. DOI:10.1134/S1061830922700048.

119 Szymanik B., Psuj G., Lopato P. Qualitative evaluation of 3D printed materials' structure using active infrared thermography and signal analysis based on LSTM neural networks // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2022. DOI:10.3233/JAE-210197.

120 3D Sensors & Infrared Cameras for all Industries [Электронный ресурс] // Automation Technology GmbH. URL: <https://www.automationtechnology.de/cms/en/mobile-ndt-systems-for-maintenance/> (дата обращения 17.12.2024).

121 OPTICAL GAS IMAGING SOLUTIONS BY OPGAL [Электронный ресурс] // Infrared Thermal Cameras and Optical Gas Imaging & More | Opgal / OPGAL Beyond the visible. URL: <https://www.opgal.com/> (дата обращения 17.12.2024).

122 Products of Thermal Wave Imaging [Электронный ресурс] // Thermal Wave Imaging. URL: <https://www.thermalwave.com/products/> (дата обращения 17.12.2024).

123 Safran Group website [Электронный ресурс] // Safran Nacelles launches a new automated non-destructive testing solution using infrared thermography and augmented reality, a world first. URL: <https://www.safran-nacelles.com/media/safran-nacelles-launches-new-automated-non-destructive-testing-solution-using-infrared-thermography-and-augmented-reality-world-first-20170404/> (дата обращения 17.12.2024).

124 Metrology News [Электронный ресурс] // Robotic Inspection To Allow Safer & More Cost Effective Aircraft Manufacturing Processes. URL: <https://metrology.news/robotic-inspection-to-allow-safer-more-cost-effective-aircraft-manufacturing-processes/> (дата обращения 17.12.2024).

125 Laboratory NDT systems for Thermography [Электронный ресурс] // Test-Labor-Prüfgeräte & Prüfsysteme Thermografie / edevis GmbH. URL: <https://www.edevis.com/en/products/laboratory-testing-systems/> (дата обращения 17.12.2024).

126 Wärmebildkameras & Systemlösungen [Электронный ресурс] // InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik / © 2024 InfraTec GmbH. URL: www.infratec.de/ (дата обращения 17.12.2024).

127 ThermoCalc 3D: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2013612064. Российская Федерация / Вавилов В.П., Суханов М.С.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 20.03.2013.

128 Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. // Труды ВИАМ. – 2022. – Т.11. – С. 81-91.

129 Bossi R.H., Giurgiutiu V. Polymer composites in the aerospace industry // Woodhead Publishing. – 2015. – № 15 – P. 413-448.

130 Karthigeyan P., Senthil Raja M., Hariharan R., Karthikeyan R., Prakash S. Performance evaluation of composite material for aircraft industries // Materials Today: Proceedings. – 2017. – V. 4. – P. 3263-3269.

131 Duan Y., Zhang H., Maldague X., Ibarra-Castanedo C., Servais P., Genest M., Sfarra S., Meng J.-Q. Reliability assessment of pulsed thermography and ultrasonic testing for impact damage of CFRP panels // NDT & E International. – 2018. DOI:10.1016/j.ndteint.2018.11.010.

132 Способ активного одностороннего теплового контроля скрытых дефектов в твердых телах: пат. №2509300С1. Российская Федерация: МПК 51 / Вавилов В.П.,

Иванов А.И., Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.03.2014. Бюл. 7.

133 Тепловой дефектоскоп: пат. №2696933С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/00, G01J 5/60 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 07.08.2019. Бюл. 22.

134 Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля цилиндрических металлических изделий: пат. №142185 U1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00 / Вавилов В.П., Чулков А.О., Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 20.06.2014. Бюл. 17.

135 Тепловизионный дефектоскоп: пат. №2580411С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/00, G01J 5/60 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О., Нестерук Д.А. патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.04.2016. Бюл. 10.

136 Способ теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий: пат. №2774040 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/00 / Вавилов В.П., Чулков А.О., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Шильников Г.В., Щепелин В.Я., Перепелица А.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 14.06.2022. Бюл. 17.

137 Чулков А.О., Вавилов В.П., Московченко А.И. Активный тепловой контроль отслоений в теплозащитных конструкциях // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 58-65.

138 Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Шагдыров Б.И. Тепловой сканер-дефектоскоп для контроля крупногабаритных плоских изделий из композиционных материалов // Дефектоскопия. – 2022. – №4. – С. 56-62.

139 Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П., Шильников Г.В., Перепелица А.А., Щепелин В.Я. Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль крупногабаритных изделий // В мире неразрушающего контроля. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 56-59.

140 Ibarra-Castanedo C., Servais P., Klein M., Boulanger T., Kinard A., Hoffait S., Maldague X. Detection and characterization of artificial porosity and impact damage in aerospace carbon fiber composites by pulsed and line scan thermography // *Applied Sciences*. – 2023. – №13. DOI:10.3390 / app13106135.

141 Cramer K., Perey D.F., Brown J.L. The application of line scan thermography using multiple collaborative robots // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. – 2019. Portland, USA. – P. 4.

142 Mokhtari Y., Gavérina L., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Comparative study of line scan and flying line active IR thermography operated with a 6-axis robot // *Proceedings 2018 Quantitative InfraRed Thermography*. – 2018. DOI:10.21611/qirt.2018.080.

143 Ibarra-Castanedo C., Servais P., Ziadi A., Klein M., Maldague X. RITA - Robotized inspection by thermography and advanced processing for the inspection of aeronautical components // *Proceedings of Quantitative InfraRed Thermography*. – 2014. DOI:10.21611/qirt.2014.164.

144 Lison M., Hendrick P., Servais P., Dufour Y. Evaluation of NDT by robotic line scan thermography on composite aircraft parts // *Proceedings of Structural Health Monitoring*. – 2017. DOI:10.12783/shm2017/13853.

145 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Kladov D.Y. Principle, equipment and applications of line-scanning infrared thermographic NDT // *Journal of nondestructive evaluation*. – 2023. DOI: 10.1007/s10921-023-01001-4.

146 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Burleigh D., Moskovchenko A.I. A method and apparatus for inspecting large flat composite parts by using the infrared LST technique // *Frattura ed integrità strutturale*. – 2023. DOI: 10.3221/igf-esis.63.11.

147 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Sommier A., Pradere C., Siddiqui A., Prasad Y.L. Analyzing efficiency of optical and THz infrared thermography in nondestructive testing of GFRP by using the Tanimoto Criterion // *NDT & E International*. – 2022. DOI:10.1016/j.ndteint.2020.102383.

148 Nesteruk D., Vavilov V., Chulkov A., Burleigh D. Simple and robust methodology of defect thermal characterization based on thermal quadrupoles and polynomial approximation // *NDT and E International*. – 2021. – V. 124. – P. 102522.

149 Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Shagdyrov B., 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. – V. 114. – P. 103675.

150 Duan Y., Liu S., Hu C., Hu J. Automated defect classification in infrared thermography based on a neural network // *NDT & E International*. – 2019. – V. 107. – P. 102147.

151 Dudzik S. Two-stage neural algorithm for defect detection and characterization uses an active thermography // *Infrared Physics and Technology*. – 2015. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.03.003.

152 Устройство для теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий: пат. №2697437 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Нестерук Д.А., Чулков А.О., Шильников Г.В., Щепелин В.Я., Перепелица А.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 14.08.2019. Бюл. 23.

153 Сканирующий тепловизионный дефектоскоп: пат. №2786045 С1. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72, G01J 5/60 / Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 16.12.2022. Бюл. 35.

154 ThermoCalc 3D Pro: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023688527. Российская Федерация / Вавилов В.П., Суханов М.С. Чулков А.О.; патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 22.12.2023. Бюл. №1.

155 ThermoScan: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021664038. Российская Федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.; патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 30.08.2021. Бюл. № 9.

156 Al-Athel K., Alhasan M., Alomari A., Arif A. Damage characterization of embedded defects in composites using a hybrid thermography, computational, and artificial neural networks approach // Heliyon. – 2022. DOI:10.1016/j.heliyon.2022.e10063.

157 Saeed N., Omar M., Abdulrahman Y. A neural network approach for quantifying defects depth, for nondestructive testing thermograms // Infrared Physics & Technology. – 2018. DOI:10.1016/j.infrared.2018.08.022.

158 Khan A., Raouf I., Rim Y., Lee J., Woo S., Kim S. Autonomous assessment of delamination in laminated composites using deep learning and data augmentation // Composite Structures. – 2022. DOI:10.1016/j.compstruct.2022.115502.

159 Parker W.P., Jenkins R.J., Butter C. P., Gutter G.L., Abbott G.L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. Journal of Applied Physics. – 1961. – V. 32, – P. 1679-1684.

160 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Smotrova S.A., Smotrov A.V., Scherbakov V.N., Storozhenko V.A. Infrared thermographic analysis of thermal property variations in composites subjected to impact damage, thermal cycling and moisture saturation // Composite Structures. – 2022. – Т. 296. – P. 115927.

161 Thermo_NN: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020619186. Российская федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 13.08.2020. Бюл. №8.

162 ThermoFit Pro: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019662050. Российская Федерация / Ширяев В.В., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 16.09.2019. Бюл. №9.

163 Ширяев В.В., Московченко А.И., Вавилов В.П. Тепловая томография// Программа для ЭВМ № 2018664832. Дата публикации 22.11.2018 г. Бюл. 12.

164 AIRBUS A318/A319/A320/A321. Nondestructive Testing Manual. – 2009. – № 55-20-07 290-801-A-01. – P. 20.

165 Servais P., Ibarra-Castanedo C., Maldague X., Gélébart Y., Duan Y. Probability of detection for in field thermal non destructive testing of aircraft composite structures // Proceedings X QIRT conference. – 2010. DOI: 10.21611/qirt.2010.124.

166 Yekani M., Fard S., Raji B. Damage characterization of surface and sub-surface defects in stitch-bonded biaxial carbon/epoxy composites // Composites Part B: Engineering. – 2014. – № 56. – P. 821-829.

167 Ley O., Butera M., Godinez V. Inspection of composite structures using linescanning thermography // Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering. – 2012. DOI: 10.1117/12.919176.

168 Domin J., Górski M., Bialecki R., Zając J., Grzyb K., Kielan P., Adamczyk W., Ostrowski Z., Wienchol P., Lamkowski K., Kamiński J., Doledutko M., & Rosiek R. Wheeled robot dedicated to the evaluation of the technical condition of large-dimension engineering structures // Robotics. – 2020. DOI:/10.3390/robotics9020028.

169 Thomas K.R., Balasubramaniam K. Scanning induction thermography (SIT) for imaging damages in carbon-fibre reinforced plastics (CFRP) components // AIP Conference Proceedings. – 2015. DOI: 10.1063/1.4914624.

170 Woolard D.F., Cramer K.E. Line scan versus flash thermography: Comparative study on reinforced carbon-carbon // Proceedings of SPIE Thermosense-XXVII. – 2005. DOI: 10.1117/12.603789.

171 Khodayar F., López F., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Optimization of the inspection of large composite materials using robotized line scan thermography // Journal of Nondestructive evaluation. – 2017. DOI: 10.1007/S10921-017-0412-X.

172 Khodayar F., Lopez F., Ibarra-Castaneda C., Maldague X. Parameter optimization of Robotized Line Scan thermography for CFRP composite inspection // Journal of Nondestructive evaluation. – 2018. DOI: 10.1007/s10921-017-0459-8.

173 Oswald-Tranta B., Sorger M. Scanning pulse phase thermography with line heating // QIRT Journal. – 2012. DOI: 10.1080/17686733.2012.714967.

174 Moran J., Rajic N. Remote Line Scan Thermography for the rapid inspection of composite impact damage // Composite Structures. – 2018. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.10.038.

175 Maldague X., Jones T.S., Kaplan H., Marinetti S., Prystay M. Chapter 2: Fundamentals of Infrared and Thermal Testing: Part 1. Principles of Infrared and Thermal Testing // *Nondestructive Handbook, Infrared and Thermal Testing*. – 2001. – V.3. Columbus. Ohio. ASNT Press. – P. 718.

176 Szymanik B., Chady T., Gorący K. Active infrared thermography with forced cooling for composites evaluation // *Proceedings of 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference*. – 2018. DOI:10.21611/qirt.2018.p48.

177 Yang R., He Y. Optically and non-optically excited thermography for composites: A Review // *Infrared Physics & Technology*. – 2016. ISSN 13504495.

178 Lukaszuk R.D., Marques R.M., Chady T. Lock-In thermography with cooling for the inspection of composite materials // *Materials*. – 2023. DOI: 10.3390/ma16216924.

179 Piero G., Fierro M., Flora F., Boccaccio M., Meo M. Real-time automated composite scanning using forced cooling infrared thermography // *Infrared Physics and Technology*/ – 2021. DOI:10.1016/j.infrared.2021.103860.

180 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Shagdirov B.I., Kladov D.Yu., 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. – P. 592-600.

181 ThermoCalc_НС: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022662003. Российская Федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П., Суханов М.С.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 29.06.2022. Бюл. №7.

182 ГОСТ 26629-85 Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. – М.: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1985. – 9.

183 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Pawar S.S. Optimizing components and evaluating technical performance of ir thermographic NDT systems // *Proceedings of SPIE "Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII"*. – 2016. – P. 98610M.

184 Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Chulkov A.O., Shiryaev V.V. An apparatus for the active thermal testing of corrosion in steel cylindrical containers and test results // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2013. DOI: 10.1134/S1061830913110089.

185 Chulkov A.O., Vavilov V.P. Hardware and software for thermal nondestructive testing of metallic and composite materials // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012011.

186 López F., Sfarra S., Chulkov A., Vavilov V., Ibarra-Castanedo C., Zhang H., Maldague X.P.V., Omar M.A. Thermal stresses applied on helicopter blades useful to retrieve defects by means of infrared thermography and speckle patterns // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – T. 18. – P. 100511.

187 Moskovchenko A., Švantner M., Vavilov V., Chulkov A. Analyzing probability of detection as a function of defect size and depth in pulsed IR thermography // *NDT & E International*. – 2022. – T. 130. – P. 102673.

188 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Shiryaev V.V. Practical limits of pulsed thermal NDT: The concept of additive/multiplicative noise // *NDT & E International*. – 2022. – T. 130. – P. 102677.

189 Moskovchenko A.I., Vavilov V.P., Chulkov A.O. Comparing the efficiency of defect depth characterization algorithms in the inspection of CFRP by using one-sided pulsed thermal NDT // *Infrared Physics & Technology*. – 2020. – T. 107. – P. 103289.

190 Moskovchenko A.I., Vavilov V.P., Chulkov A.O., Bernegger R., Maierhofer C. Detecting delaminations in semitransparent glass fiber composite by using pulsed infrared thermography // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2020. – T. 39. – № 3. – P. 69.

191 Moskovchenko A.I., Švantner M., Vavilov V.P., Chulkov A.O. Characterizing depth of defects with low size/depth aspect ratio and low thermal reflection by using pulsed IR thermography // *Materials*. – 2021. – T. 14. – № 8.

192 Rani A., Mulaveesala R. Novel pulse compression favorable excitation schemes for infrared nondestructive testing and evaluation of glass fibre reinforced polymer materials // *Composite Structures*. – 2022. – P. 286.

193 Ward C., Burleigh D. Pulse thermography applications in aerospace composites manufacturing processes // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. – 2020. – V. 11409. – P. 114090J.

194 Liu K., Liu Y., Perilli S., Chulkov A.O., Vavilov V., Yao Y., Omar M., Sfarra S. Defining the thermal features of sub-surface reinforcing fibres in non-polluting thermo-acoustic insulating panels: A numerical-thermographic-segmentation approach // Infrastructures. – 2021. – T. 6. – № 9.

195 Vavilov V., Chulkov A., Shiryaev V., Kladov D. A novel reference-free technique for processing one-sided thermal NDT results in the time domain // NDT & E International. – 2024. – T. 143. – C. 103032.

196 Pye C.J., Adams R.D. Detection of damage in fibre reinforced plastics using thermal fields generated during resonant vibration // NDT International. – 1981. – V.14. – I. 3. – P.111-118.

197 Rizi A.S., Hedayatrasa S., Maldague X., Vukhanh T. FEM Modelling of ultrasonic vibrothermography of damaged plate and qualitative study of heating mechanisms // Infrared Physics & Technology. – 2013. – V. 61. – P. 101-110.

198 Вавилов В.П., Хорев В.С., Чулков А.О. Исследование метода ультразвукового инфракрасного контроля трещин в композиционных материалах // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 197-201.

199 Harb M., Yuan F., A Rapid. Fully Non-contact hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves // Ultrasonics. – 2015. – V. 61. – P. 62-70.

200 Delrue S., Van Deen Abelee K. Detection of defect parameters using non-linear air-couple emission by ultrasonic guided waves at contact acoustic nonlinearities. // Ultrasonics. – 2015. – V. 63. – P. 147-154.

201 Mevissen F., Meo M. Ultrasonically stimulated thermography for crack detection of turbine blades. // Infrared Physics and Technology. – 2022. – P. 104061.

202 Detecting Flaws within Objects Quickly and Easily Using Ultrasonic and Laser Light Release of the MIV-X Ultrasonic Optical Flaw Detector // UPL: <https://www.shimadzu.com/news/m9rtjwiflfafi460.html>.

203 Hiremath S.R., Mahapatra R., Srinivasan S. Detection of crack in metal plate by thermo sonic wave based detection // Using FEM. JEST-M. – 2012. – V.1. – P. 12-18.

204 Чулков А.О., Нестерук Д.А. Контроль дефектов в заклепочных соединениях образцов из алюминия методом ультразвуковой инфракрасной термографии // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 79-81.

205 Rahammer M., Vetter D., Kreuzbruck M. Optical excitation thermography with VCSEL-array source // Quantitative InfraRed Thermography. – 2016. DOI:10.21611/qirt.2016.104

206 Pickering S., Almond D.-P. Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography // NDT & E Int. – 2008. – V. 41. – P. 501-509.

207 Chulkov A.O., Sfarra S., Saeed N., Peeters J., Ibarra Castanedo C., Gargiulo G., Steenackers G., Maldague X., Omar M., Vavilov V. Evaluating quality of marquetries by applying active IR thermography and advanced signal processing // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2021. – №143. – P. 3835-3848.

208 Oswald-Tranta B. Induction thermography for surface crack detection and depth determination // Applied Science. – 2018. – №8(2). – P. 257.

209 Oswald-Tranta B., Tuschl C. Detection of short fatigue cracks by inductive thermography // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – P. 418.

210 Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation // Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering. – 2014. DOI: 10.1117/12.2049810.

211 Malfense Fierro G.P., Ginzburg D., Ciampa F., Meo M. Imaging of barely visible impact damage on a complex composite stiffened panel using a nonlinear ultrasound stimulated thermography approach // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2017. DOI: 10.1007/s10921-017-0449-x.

212 Lu J. Study of the effect of crack closure in sonic infrared imaging // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2007. DOI: 10.1080/10589750701448175.

213 Swiderski W., Pracht M. Ultrasonic IR Thermography Detection of Defects in Multi-layered Aramide Composites // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – V. 21. – P.1-7.

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

215 Ciampa F., Mahmoodi P., Pinto F., Meo M. recent advances in active infrared thermography for non destructive testing of aerospace components // Sensors. – 2018. DOI: 10.3390/s18020609.

216 Bonaccorsi L., Garesci F., Giacobbe F., Freni F. Applications in metallurgy of X-ray computed tomography with variable focal spot-size and infrared thermography // La Metallurgia Italiana. – 2013. – № 105. – P. 33-40.

217 Vavilov V., Chulkov A., Dubinskii S., Derusova D., Zhvyrbliia V. Nondestructive testing of composite T-Joints by TNDT and other methods // Polymer Testing. – 2021. – V. 94. – P. 107012.

218 Vavilov V.P., Karabutov A.A., Chulkov A.O., Cherepetskaya E.B., Mironova E.A. Comparative study of active infrared thermography, ultrasonic laser vibrometry and laser ultrasonics in application to the inspection of graphite/epoxy composite parts // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2019. DOI: 10.1080/17686733.2019.1646971.

219 Balageas D. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2016. – V. 35. – P. 1-18.

220 Долматов Д.О., Чулков А.О., Нестерук Д.А., Кашкаров Е.Б., Вавилов В.П. Синтез результатов акустического и теплового контроля металлополимерных композитных материалов // Дефектоскопия. – 2024. – № 11.

221 Umar Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Quantitative study of local heat sources by Ultrasonic Infrared Thermography: An approach for estimating total energy released by low energy impact damage in C/C composite // Composites Part B: Engineering. – 2019. – V.165. – P. 167-173.

222 ThermoSon: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020619856. Российская Федерация / Суханов М.С., Вавилов В.П., Чулков А.О., Дерусова Д.А.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 25.08.2020. Бюл. № 9.

223 ThermoFusion: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2021663926. Российская Федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 26.08.2021. Бюл. № 9.

224 Устройство для бесконтактного определения коэффициента температуропроводности твердых тел: пат. №2549549. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/18, G01J 5/60 / Вавилов В.П., Чулков А.О., Ширяев В.В.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 27.04.2015. Бюл. № 12.

225 Чулков А.О. Разработка метода и аппаратуры активного теплового контроля металлических и композиционных материалов и изделий: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Чулков Арсений Олегович. – Томск, 2016. – 142 с.

226 Способ бесконтактного одностороннего активного теплового неразрушающего контроля: пат. №2590347. Российская Федерация: МПК 51 G01N 25/72 / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулко А.О.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 10.07.2016. Бюл. № 19.

227 Groz M.-M., Bensalem M., Sommier A., Abisset-Chavanne E., Chevalier S., Battaglia J.-L., Batsale J.-C., Pradere C., Chulkov A. Estimation of thermal resistance field in layered materials by analytical asymptotic method // Applied Science. – 2020. – Т. 10. – № 7. – P. 2351.

228 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Sfarra S., Zhang H., Maldague X.P.V., Osman A., Szielasko K., Stumm C., Sarasini F., Fiorelli J. Evaluating thermal properties of sugarcane bagasse-based composites by using active infrared thermography and terahertz imaging // Infrared Physics & Technology. – 2019. – Т. 97. – P. 432-439.

229 Vavilov V., Chulkov A., Moskovchenko A., Smotrov A., Smotrova S. Characterizing impact damage in GFRP/CFRP composites by determining thermal

effusivity/diffusivity // Measurement Science and Technology. – 2019. – Т. 30. – № 3. – P. 034003.

230 Simonova O.S., Chulkov A.O., Vavilov V.P., Suntsov S.B. Infrared thermographic testing of hyperconductive flat heat pipes // Optical Engineering. – 2018. – Т. 57. – № 3. – P. 035105.

231 V.P. Vavilov, D.A. Nesteruk, A.O. Chulkov, Plesovskih S.A. A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts // Composites Part B: Engineering. – 2015. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.007.

232 Vavilov V. P., Shiryaev V. V., Chulkov A. O. A novel data processing algorithm in thermal property measurement and defect detection by using one-sided active infrared thermography // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering – 2015. DOI: 10.1117/12.2175645.

233 Нестерук Д.А., Вавилов В.П., Чулков А.О., Симонов А. Программное обеспечение для тепловых дефектоскопов // В мире неразрушающего контроля. – 2020. – Т. 23. – № 2. – С. 40-43.

234 Чулков А.О., Вавилов В.П., Серьёзов А.Н., Брагин А.А. Разработка методики активного одно-и двухстороннего теплового контроля углепластиковых элементов планера самолета твс-2дтс в условиях производства // В сборнике: X Всероссийской конференции ТестМат. – 2018. – С. 350-360.

235 ТПУ. Ученые из Томска улучшили прибор для контроля дефектов в авиастроении [Электронный ресурс] // ТАСС. URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/18247635/> (дата обращения 17.12.2024).

236 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Malakhov A.S. A LED-based thermal detector of hidden corrosion flaws // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. DOI: 10.1134/S1061830916100041.

237 ТПУ. Ученые Томского политеха усовершенствовали дефектоскоп для авиации [Электронный ресурс] // Интерфакс-Россия. URL: <https://www.interfax-russia.ru/siberia/news/uchenye-tomskogo-politeha-usovershenstvovali-defektoskop-dlya-aviacii/> (дата обращения 17.12.2024).

238 ТПУ. Ученые Томского политеха улучшили тепловой дефектоскоп для контроля авиационных композитных материалов [Электронный ресурс] // ТПУ. URL: <https://news.tpu.ru/news/uchenye-tomskogo-politekha-uluchshili-teplovoy-defektoskop-dlya-kontrolya-aviatsionnykh-kompozitnykh/> (дата обращения 17.12.2024).

239 Активная количественная инфракрасная термография (SOLIRT): свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018666023. Российская Федерация / Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Дата публикации 11.12.2018. Бюл. № 12.

240 Chulkov A.O., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., Pan Y.-Y. Quantitative evaluation of water content in composite honeycomb structures by using one-sided infrared thermography: is there any promise? // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2017. – P. 102140U.

241 Vavilov V., Pan Y., Chulkov A., Marinetti S. Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: qualitative and quantitative aspects // Polymer Testing. – 2016. – Т. 54. – P. 270-280.

242 Chulkov A.O., Shagdyrov B.I., Vavilov V.P., Kladov D.Yu., Stasevskiy V.I. Detecting and evaluating water ingress in horizontally oriented aviation honeycomb panels by using automated thermal nondestructive testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – Т. 59. – № 12. – P. 1272-1279. (версия статьи на русском языке: Чулков А.О., Шагдыров Б.И., Вавилов В.П., Кладов Д.Ю., Стасевский В.И. Обнаружение и оценка количества воды в горизонтально ориентированных авиационных сотовых панелях с помощью автоматизированного теплового контроля // Дефектоскопия. – 2023. – № 12. – С. 26-33).

243 Чулков А.О., Gaverina L., Pradere C., Batsale J.C., Вавилов В.П. Обнаружение воды в сотовых композиционных конструкциях методом терагерцовой термографии // Дефектоскопия. – 2015. – № 8. – С. 72-76.

244 Henneke E.G., Reifsnider K.L. and Stinchcomb W.W. Thermography, an NDI method for damage detection // Journal of Metal. – 1979. – P. 11-15.

245 Gleiter A., Riegert G., Zweschper Th. and Busse G. Ultrasound lock-in thermography for advanced depth resolved defect selective imaging // *Insight*. – 2007. – V. 49. – N. 5. – P. 272-274.

246 Mignogna R.B., Green R.E., Duke J., Henneke, E.G. and Reifsnider, K.L. Thermographic Investigation of high-power ultrasonic heating in materials // *Ultrasonics*. – 1981. – V.7. – P.159-163.

247 Reifsnider K.L., Henneke E.G., Stinchcomb W.W. The mechanics of vibrothermography, mechanics of nondestructive testing // Plenum Press. New York. – 1980. – P. 249-276.

248 Favro L.D., Han X., Ouyang Z., Sun G., Sui H., Thomas R.L. IR imaging of cracks excited by an ultrasonic pulse // *Proc. SPIE Thermosense-XXII*. – 2000. – V. 4020. – P. 182-185.

249 Han X., Li W., Zeng Z., Favro L.D., Thomas R.L. Acoustic chaos and sonic infrared imaging // *Applied Physics Letter*. – 2002. – V. 81. – P. 3188-3190.

250 Burke M.W., Miller W.O. Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory // *Proc. SPIE. Thermosense-XXVI*. – 2004. – V. 5405. – P. 313-321.

251 Литвиненко О.В. Исследование термоакустических эффектов в кремниевых пластинах дис. канд. наук: 01.04.10 / Литвиненко Ольга Викторовна. – Ульяновск, 2003. – 126 с.

252 Umar M.Z., Vavilov V.P., Abdullah H., Ariffin A.K. Ultrasonic infrared thermography in nondestructive testing: A review // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2016. – V. 52, – N. 4. – P. 212-219.

253 Pieczonka L., Szwed M., Uhl T. Vibrothermography - Measurement system development and testing // *Diagnostics and Structural Health Monitoring*. – 2011. – V. 2. – I. 58. – P. 61- 66.

254 Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Хорев В.С. Ультразвуковой инфракрасный метод выявления ударных повреждений и усталостных трещин в металлах и композитах // *В мире Неразрушающего Контроля*. – 2010. – №1. – С. 36-58.

255 Ширяев В.В., Хорев В.С. Тепловой контроль ударных повреждений в углепластике с применением ультразвуковой стимуляции // Контроль. Диагностика. – 2011. – С. 112-114.

256 Shepard S.M., Ahmed T., Lhota J. Experimental Considerations in Vibrothermography // Proc. of SPIE. – 2004. – V. 5405. – P. 332-335.

257 Ермолов И.Н., Гитис М.Б., Королев М.В. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля // Машиностроение. – 1986. – С. 280.

258 Harb M., Yuan F., A Rapid Fully Non-contact hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves. // Ultrasonics. – 2015. – V. 61. – P. 62-70.

259 Hayashi T., Inoue D. Calculation of leaky lamb waves with a semi-analytical finite element method // Ultrasonics. – 2014. – V. 54. – P. 1460-1469.

260 Umar M.Z., Vavilov V.P., Abdullah H., Ariffin A.K. Detecting low-energy impact damages in carbon-carbon composites by ultrasonic infrared thermography // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. DOI:10.1134/S1061830917070099.

261 Shagdyrov B.I., Chulkov A.O., 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.

262 Derusova D.A., Vavilov V.P., Chulkov A.O., Shagdirov B.I., 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. – P. 1001-1003.

263 Чулков А.О., Вавилов В.П., Жуков О.М. Тепловой неразрушающий контроль трещин в газотурбинных лопатках с использованием ультразвуковой стимуляции // Дефектоскопия. – 2024. – № 5. – С. 61-70.

263 Zhang H., Holub W., Fernandes H., Hassler U., Joncas S., Robitaille F., Maldague X. Infrared thermography and X-Ray tomography for non-destructive evaluation of micro-defects in CFRP // Conference: Quantitative InfraRed Thermography Asia. – 2015. DOI:10.21611/qirt.2015.0093.

264 Xiao X., Gao B., Tian G., Qing Wang K. Fusion model of inductive thermography and ultrasound for nondestructive testing // *Infrared Physics & Technology*. – 2019. – V. 101. – P. 162-170.

265 Yilmaz B., Ba A., Jasiuniene E., Bui H.K., Berthiau G. Evaluation of bonding quality with advanced nondestructive testing and data fusion // *Sensors*. – 2020. – V. 20. – P. 5127.

266 Daryabor P., Safizadeh M.S. Image fusion of ultrasonic and thermographic inspection of carbon/ epoxy patches bonded to an aluminum plate // *NDT & E International*. – 2017. – V. 90. – P. 1-10.

267 Torbali M.E., Zolotas A., Avdelidis N.P. A state-of-the-art review of non-destructive testing image fusion and critical insights on the inspection of aerospace composites towards sustainable maintenance repair operations // *Applied Sciences*. – 2023. – V. 13. – №4. – P. 2732.

268 M. Romano, A.O. Chulkov, A. Sommier, D. Balagas, V.P. Vavilov, C. Pradere, J-C. Batsale Broadband sub-terahertz camera based on photothermal conversion and IR thermography // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2016. DOI:10.1007/s10762-015-0241-x.

269 Thermo_Visual: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022662013. Российская Федерация / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.: патентообладатель Томский политехнический университет. Дата публикации 29.06.2022. Бюл. № 7.

270 ТПУ. Ученые ТПУ разрабатывают комплекс для поиска дефектов в композитах [Электронный ресурс] // Региональное информационное агентство Томск. URL : <https://www.riatomsk.ru/article/20220530/tpu-nerazrushayuschij-kontrolj/> (дата обращения 17.12.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патенты на изобретение устройств и способов, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) **2 786 045** (13) C1ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(51) МПК
[G01N 25/72 \(2006.01\)](#)
[G01J 5/60 \(2006.01\)](#)
(52) СПК
[G01N 25/72 \(2022.08\)](#)
[G01N 25/72 \(2022.08\)](#)
[G01J2005/0077 \(2022.08\)](#)
[G01J 5/605 \(2022.08\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 20.12.2022)
 Пошлина: Установленный срок для уплаты пошлины за 3 год: с 06.05.2023 по 05.05.2024. При
 уплате пошлины за 3 год в дополнительный 6-месячный срок с 06.05.2024 по 05.11.2024
 размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: [2022112560](#), 05.05.2022(24) Дата начала отчета срока действия патента:
05.05.2022Дата регистрации:
16.12.2022Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 05.05.2022

(45) Опубликовано: 16.12.2022 Бюл. № 35

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: J. Domin, R. Bialecki, J. Zajac et al,
"Wheeled robot dedicated to the evaluation of
the technical condition of large-dimension
engineering structures", Robotics, 2020, 9(2),
28. Найдено 25.10. 2022 в Интернет URL
<https://www.mdpi.com/2218-6581/9/2/28/htm>.
Чулков А. О. Вавилов В. П. Нестерук Д. А.
Ширьев В. В., "УСТАНОВКА И
РЕЗУЛЬТАТЫ АКТИВНОГОТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КОРРОЗИИ В
СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
КОНТЕЙНЕРАХ", ДЕФЕКТОСКОПИЯ,
номер 11, 2013, С.15-20. RU 2697437 C1
14.08.2019. RU 142185 U1 20.06.2014. RU
2509300 C1 10.03.2014. US 6712502 B2
30.03.2004. WO 2010053813 A3 29.07.2010.Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАОУ
ВО "Национальный исследовательский
Томский политехнический университет",
центр трансфера технологий, Батурина
Оксана Николаевна

(72) Автор(ы):

**Чулков Арсений Олегович (RU),
Вавилов Владимир Платонович (RU),
Нестерук Денис Алексеевич (RU),
Ширьев Владимир Васильевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет" (ФГАОУ
ВО НИ ТПУ) (RU)**

(54) СКАНИРУЮЩИЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ ДЕФЕКТОСКОП

(57) Реферат:

Изобретение относится к исследованию материалов, а именно, к неразрушающему контролю материалов и изделий активным тепловым методом и может быть использовано для сплошного автоматизированного контроля подповерхностных дефектов в крупногабаритных плоских изделиях, выполненных из композиционных материалов и сотовых структур и относящихся к авиационной, ракетной и космической отраслям промышленности. Сканирующий тепловизионный дефектоскоп содержит два шаговых двигателя, которые прикреплены к внутренней поверхности поперечины, соединяющей два лонжерона несущей П-образной рамы в ее передней части. На валах шаговых двигателей, пропущенных через отверстия в лонжеронах, закреплены ведущие колеса. На внешней стороне каждого из лонжеронов на равном расстоянии от ведущего колеса и друг от друга закреплены валы, на которые с помощью подшипников посажены натяжные ролики и ведомое колесо. Ведущие и ведомые колеса равных размеров снабжены выступами на их образующей и расположены на разных концах лонжеронов, причем на каждую пару ведущего и ведомого колес с натягом надет замкнутый армированный ремень, имеющий на его внутренней поверхности впадины так, что натяжные ролики, размещенные между ними, касаются внутренней поверхности ремня, внешняя поверхность которого соприкасается с поверхностью объекта контроля. К поперечине П-образной рамы прикреплен контроллер управления, к которому подключены

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** (11) **2 774 040** (13) **C1**(51) МПК
[G01N 25/72 \(2006.01\)](#)
[G01J 5/00 \(2006.01\)](#)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

Статус: действует (последнее изменение статуса: 24.10.2024)
 Пошлина: учтена за 5 год с 26.06.2025 по 25.06.2026. Установленный срок для уплаты пошлины за 6 год: с 26.06.2025 по 25.06.2026. При уплате пошлины за 6 год в дополнительный 6-месячный срок с 26.06.2026 по 25.12.2026 размер пошлины увеличивается на 50%.

(52) СПК**G01N 25/72 (2022.01); G01J 5/00 (2022.01)**(21)(22) Заявка: [2021118510](#), 25.06.2021(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.06.2021Дата регистрации:
14.06.2022Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 25.06.2021(45) Опубликовано: [14.06.2022](#) Бюл. № 17

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2697437 C1, 14.08.2019. Чулков А. О., Нестерук Д. А., Шильников Г. В. и др. Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль крупногабаритных изделий. В мире НК, 2020, Т. 23, номер 1, с.56-59. RU 142185 U1, 20.06.2014. RU 2608021 C1, 11.01.2017. KR 2015069053 A, 23.06.2015. GB 2296335 A, 26.06.1996. CN 104749204 A, 01.07.2015.

Адрес для переписки:
634050, Томская обл., г. Томск, пр-кт Ленина, 30, Отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности, ФГАОУ ВО "НИТПУ", Батурина О.Н.

(72) Автор(ы):

**Вавилов Владимир Платонович (RU),
 Чулков Арсений Олегович (RU),
 Нестерук Денис Алексеевич (RU),
 Ширяев Владимир Васильевич (RU),
 Шильников Геннадий Владимирович (RU),
 Щепелин Владимир Яковлевич (RU),
 Перепелица Анатолий Александрович (RU)**

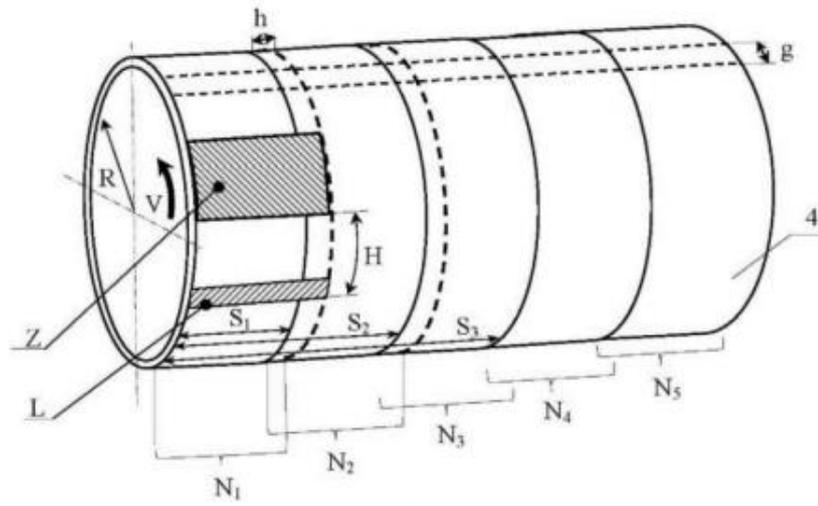
(73) Патентообладатель(и):

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

(54) СПОСОБ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**(57) Реферат:**

Изобретение относится к неразрушающему контролю скрытых дефектов в тепло- и гидроизоляционных обшивках крупногабаритных цилиндрических изделий, относящихся к химической, нефтегазовой и ракетно-космической отраслям промышленности с использованием активного теплового метода. Способ заключается в непрерывном равномерном вращении объекта контроля вокруг своей продольной оси, одновременном нагреве его наружной поверхности нагревателем, расположенным вдоль образующей объекта контроля, и регистрации температурного поля наружной поверхности объекта контроля тепловизором, расположенным таким образом, что нагретая поверхность объекта контроля попадает в поле зрения тепловизора в заданный момент времени. Регистрируют температурные поля поверхности кольцевых зон с заданным перекрытием по длине окружности объекта контроля, причем сначала регистрируют температурные поля нечетных кольцевых зон, а затем четных кольцевых зон, перемещая нагреватель и тепловизор вдоль оси объекта контроля от предыдущей кольцевой зоны к следующей относительно переднего края объекта контроля на расстояние $S = (n-1) \times (L-h)$, где S – расстояние между передним краем полосы нагрева линейного трубчатого нагревателя и передним краем объекта контроля, m ; n – порядковый номер кольцевой зоны от переднего края объекта контроля; L – длина полосы нагрева линейного трубчатого нагревателя, m ; h – заданная величина перекрытия кольцевой зоны по длине объекта контроля, m . Последовательности полноформатных термограмм всех кольцевых зон сохраняют в компьютер, затем преобразуют их в последовательности панорамных изображений, обрабатывают и преобразуют в результирующую карту дефектов объекта контроля. Технический результат – повышение достоверности результатов контроля. 4 ил., 1

табл.



Фиг. 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 697 437** (13) **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК

G01N 25/72 (2006.01)

(52) СПК

G01N 25/72 (2019.05)(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

Статус: действует (последнее изменение статуса: 26.08.2019)
Пошлина: учтена за 3 год с 05.06.2020 по 04.06.2021

(21)(22) Заявка: **2018120633**, **04.06.2018**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.06.2018Дата регистрации:
14.08.2019Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **04.06.2018**(45) Опубликовано: **14.08.2019** Бюл. № **23**(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 142185 U1, 20.06.2014. RU 2608021 C1, 11.01.2017. KR 2015069053 A, 23.06.2015. GB 2296335 A, 26.06.1996. US 5347128 A, 13.09.1994. CN 104749204 A, 01.07.2015.**Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

**Вавилов Владимир Платонович (RU),
Ширяев Владимир Васильевич (RU),
Нестерук Денис Алексеевич (RU),
Чулков Арсений Олегович (RU),
Шильников Геннадий Владимирович (RU),
Щепелин Владимир Яковлевич (RU),
Перепелица Анатолий Александрович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

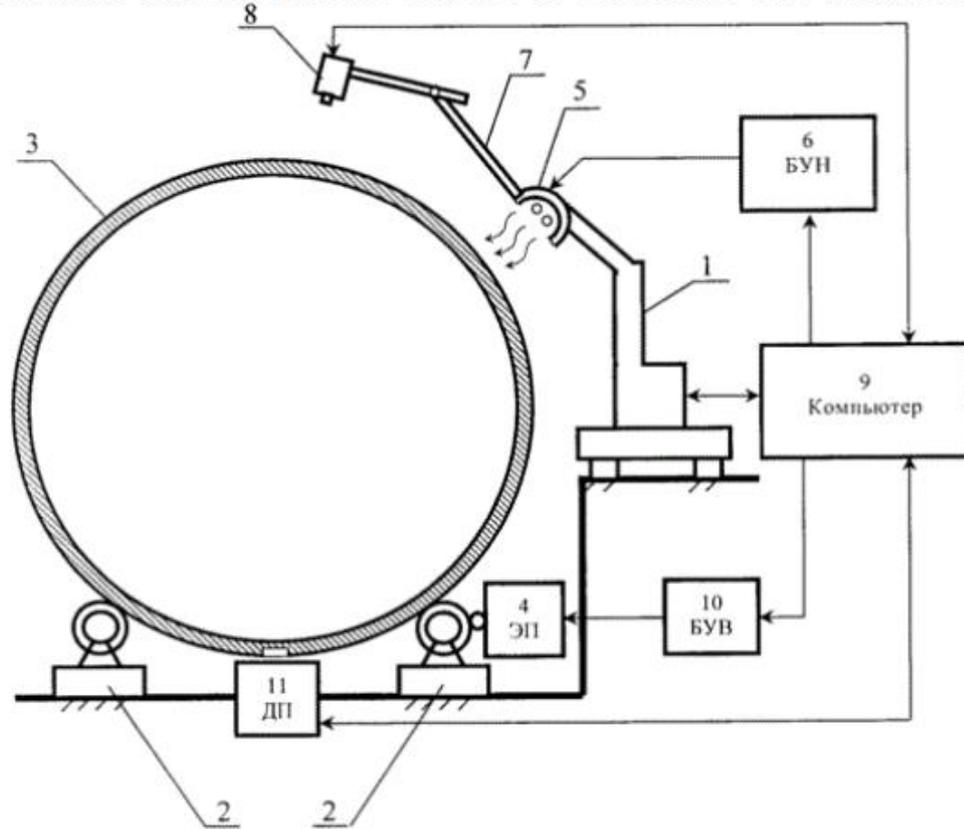
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к неразрушающему контролю скрытых дефектов в тепло- и гидроизоляционных обшивках крупногабаритных цилиндрических изделий, относящихся к химической, нефтегазовой и ракетно-космической отраслям промышленности с использованием активного теплового метода. Устройство для теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий содержит устройство вращения контролируемого изделия, тепловизор, источник нагрева, подключенные к компьютеру и расположенные с наружной стороны контролируемого изделия. Источник нагрева содержит корпус-отражатель, в котором установлено n трубчатых электрических нагревателей, соединенных с блоком управления нагревом. Источник нагрева закреплен на роботизированном манипуляторе, установленном на линейных направляющих, параллельно которым на

роликах размещено контролируемое изделие. К одному ролику подключен электрический привод, соединенный с блоком управления вращением. К корпусу-отражателю источника нагрева жестко прикреплен один конец первой штанги, к другому концу которой с помощью подвижного шарнира присоединен конец второй штанги, на другом конце которой закреплен тепловизор. К компьютеру подключены роботизированный манипулятор, блок управления нагревом, блок управления вращением и датчик положения, расположенный вблизи поверхности контролируемого изделия. Технический результат - повышение производительности контроля крупногабаритных изделий и обеспечение его автоматизации. 1 ил.



Фиг.1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 696 933** ⁽¹³⁾ **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК

[G01N 25/72 \(2006.01\)](#)[G01J 5/00 \(2006.01\)](#)[G01J 5/60 \(2006.01\)](#)

(52) СПК

[G01J2005/0077 \(2019.05\)](#)[G01J 5/0003 \(2019.05\)](#)[G01J 5/605 \(2019.05\)](#)[G01N 25/72 \(2019.05\)](#)(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

Статус: действует (последнее изменение статуса: 16.08.2019)

(21)(22) Заявка: [2018116524](#), 03.05.2018(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
03.05.2018Дата регистрации:
07.08.2019Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 03.05.2018(45) Опубликовано: [07.08.2019](#) Бюл. № 22(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 142185 U1, 20.06.2014. RU
2509300 C1, 10.03.2014. US 6712502 B2,
30.03.2004. SU 1213407 A1, 23.02.1986. US
9519844 B1, 13.12.2016. RU 2549549 C1,
27.04.2015.Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАОУ
ВО "Национальный исследовательский
Томский политехнический университет",
отдел правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

**Вавилов Владимир Платонович (RU),
Ширяев Владимир Васильевич (RU),
Чулков Арсений Олегович (RU)**

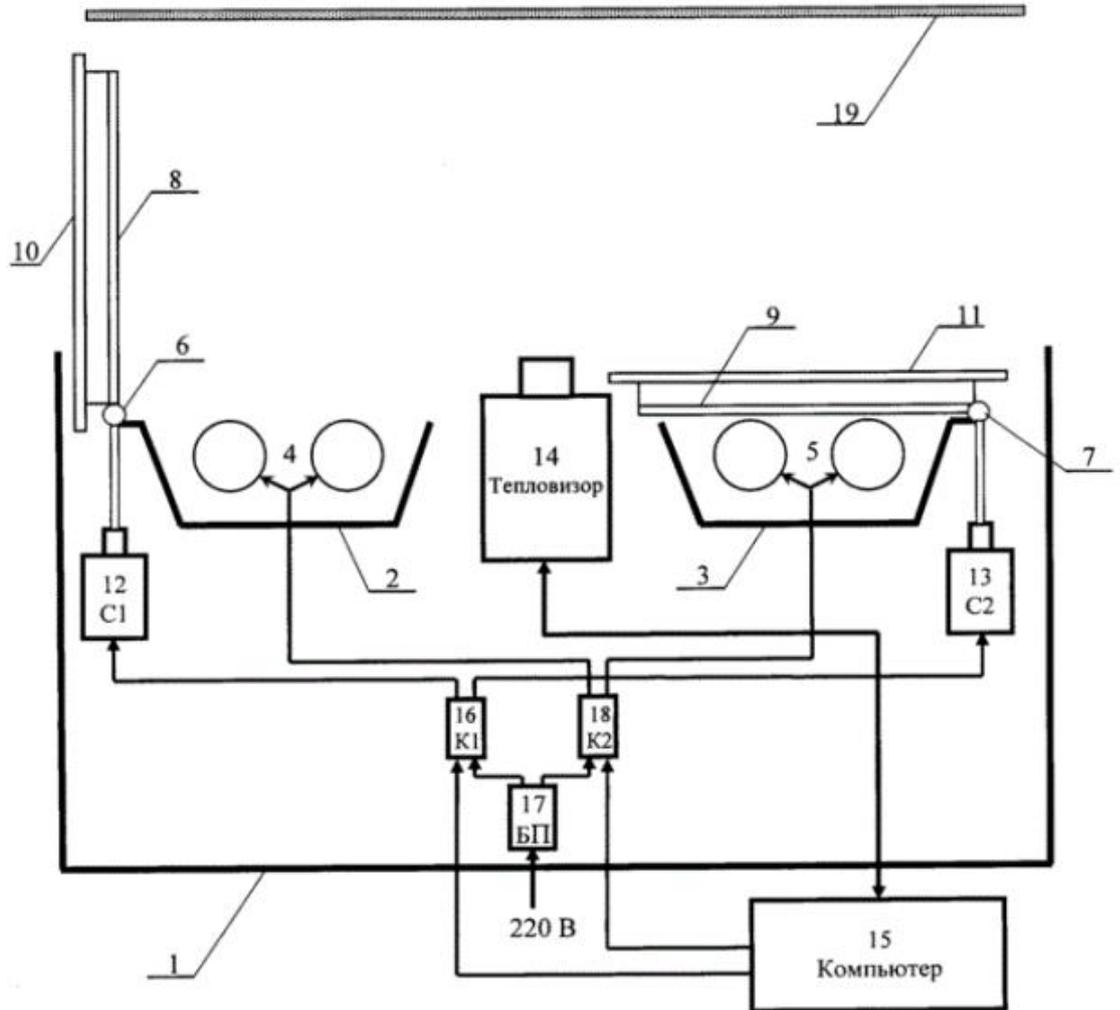
(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет" (RU)**(54) **ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП**

(57) Реферат:

Изобретение относится к неразрушающему контролю скрытых дефектов в композиционных материалах и изделиях активным тепловым методом, используемых в авиакосмической, ракетной, атомной, машиностроительной и энергетической отраслях промышленности. Тепловой дефектоскоп содержит открытый корпус, внутри которого размещены тепловизор и два оптических источника нагрева, в отражателях которых установлены галогеновые лампы. К отражателям с помощью подвижных шарниров прикреплены металлические полые шторки. Внутренние стороны шторок выполнены из металла с коэффициентом отражения не ниже 0,7. Внешние стороны шторок, выполнены из металла с коэффициентом поглощения не

ниже 0,9 и классом шероховатости не выше 3-го. Полости шторок заполнены теплоизоляционным негорючим материалом. Открытие и закрытие шторок обеспечивают соленоиды, сердечники которых прикреплены к подвижным шарнирам. Технический результат - повышение достоверности контроля за счет снижения уровня тепловых помех в контролируемой области. 1 ил.



Фиг.1

30.01.2017

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 599 919** ⁽¹³⁾ **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК

[G01N 25/72 \(2006.01\)](#)

[G01N 21/88 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 27.10.2016)
Пошлина: учтена за 3 год с 03.07.2017 по 02.07.2018

(21)(22) Заявка: [2015126520/28](#), 02.07.2015(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.07.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.07.2015

(45) Опубликовано: [20.10.2016](#) Бюл. № 29

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: S.G. Pickering, K. Chatterjee, D.P.
Almond, S. Tuli "LED optical excitation for
the long pulse and lock-in thermographic
techniques", NDT & E INTERNATIONAL,
том 58, 2013 г., стр. 72-77. US 2005056786
A1, 17.03.2005. EP 1852697 B1, 22.12.2010.
SU 1218499 A1, 15.03.1986.

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, НИ
Томский политехнический университет,
отдел правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

Вавилов Владимир Платонович (RU),
Ширяев Владимир Васильевич (RU),
Чулков Арсений Олегович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет" (RU)**

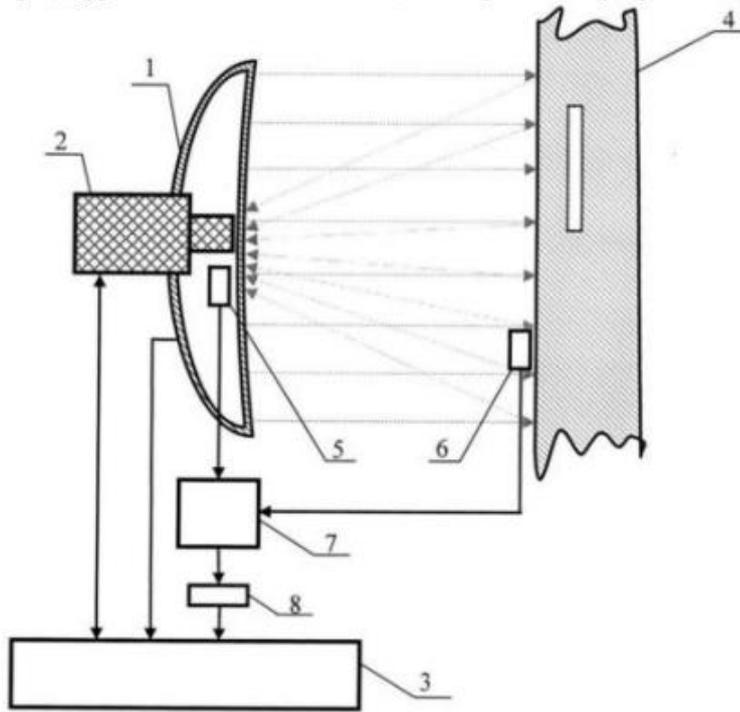
(54) ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области бесконтактного неразрушающего контроля и касается тепловизионной дефектоскопической системы. Система включает в себя тепловизионное устройство и светодиодный излучатель для нагрева контролируемого объекта, соединенные с блоком управления, а также два светочувствительных элемента. Светочувствительные элементы подключены к блоку управления через снабженный устройством сигнализации блок преобразования сигнала. Первый светочувствительный элемент находится в зоне расположения тепловизионного устройства, а второй светочувствительный элемент установлен у поверхности контролируемого объекта для регистрации падающего излучения светодиодного излучателя. Технический результат заключается в обеспечении автоматизации

30.01.2017

процедуры и повышении достоверности результатов контроля. 2 ил.



Фиг.1

30.01.2017

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) **2 590 347** (13) C1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[G01N 25/72 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 18.07.2016)
Пошлина: учтена за 3 год с 02.04.2017 по 01.04.2018

<p>(21)(22) Заявка: 2015111927/28, 01.04.2015</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 01.04.2015</p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 01.04.2015</p> <p>(45) Опубликовано: 10.07.2016 Бюл. № 19</p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2509300 C1, 10.03.2014. US 5631465 A1, 20.05.1997. US 6516084 B2, 04.02.2003. RU 2235993 C1, 10.09.2004. RU 2379668 C1, 20.01.2010. WO 2001007902 A1, 01.02.2001.</p> <p>Адрес для переписки: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, НИ Томский политехнический университет, отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности</p>	<p>(72) Автор(ы): Вавилов Владимир Платонович (RU), Ширьев Владимир Васильевич (RU), Чулков Арсений Олегович (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)</p>
--	--

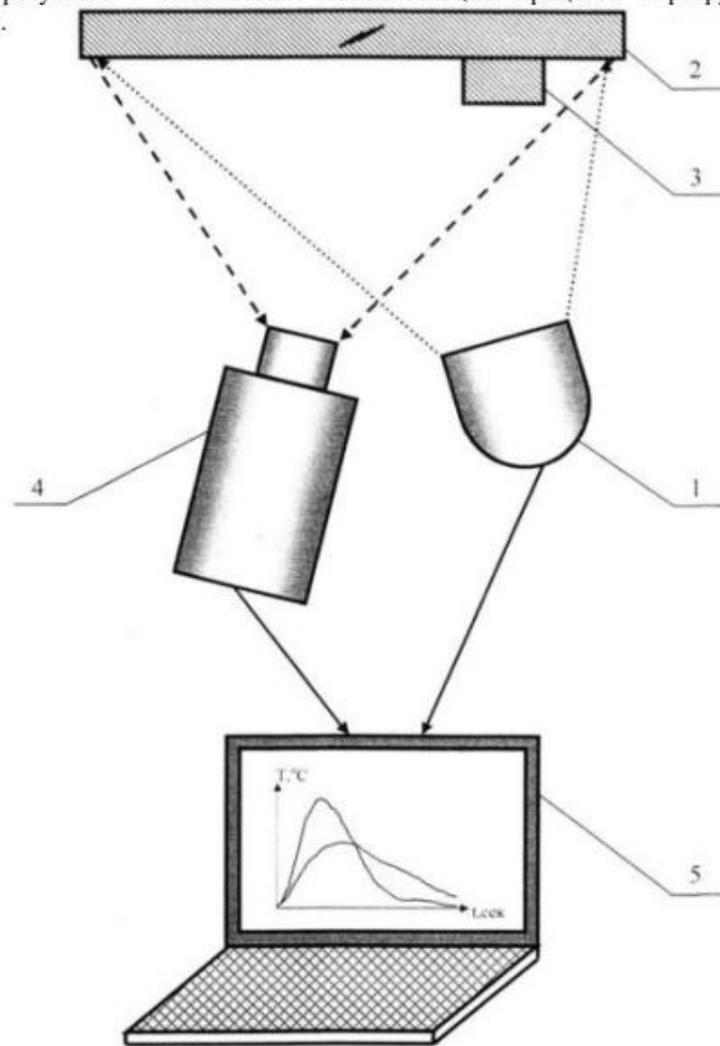
(54) СПОСОБ БЕСКОНТАКТНОГО ОДНОСТОРОННЕГО АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к способу бесконтактного одностороннего активного теплового неразрушающего контроля материалов и может быть использовано для проведения теплового неразрушающего контроля изделий в авиакосмической, машиностроительной и энергетической промышленности. Способ бесконтактного одностороннего активного теплового неразрушающего контроля включает нагрев контролируемого образца источником оптического излучения и одновременную регистрацию температуры поверхности контролируемого образца тепловизором. Причем для обеспечения автоматизации процесса контроля однотипных изделий в зону нагрева источником оптического излучения вместе с контролируемым образцом размещают эталонный образец. Последовательность инфракрасных термограмм, записанных в процессе контроля, обрабатывают методом корреляционного анализа.

30.01.2017

Технический результат - обеспечение автоматизации процесса неразрушающего контроля. 1 ил.



Фиг. 1

30.01.2017

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 580 411** ⁽¹³⁾ **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[G01N 25/00 \(2006.01\)](#)
[G01J 5/60 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 18.04.2016)
Пошлина: учтена за 3 год с 13.01.2017 по 12.01.2018

(21)(22) Заявка: [2015100441/28](#), 12.01.2015(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.01.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.01.2015

(45) Опубликовано: [10.04.2016](#) Бюл. № [10](#)(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 5631465 A1, 20.05.1997. EP
394932 B1, 04.03.1998. US 5448352 A1,
05.09.1995. EP 2141489 A1, 06.01.2010. US
4874948 A1, 17.10.1989. WO 2014199869 A1,
18.12.2014. RU 2473892 C1, 27.01.2013.

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, НИ
Томский политехнический университет,
отдел правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

Вавилов Владимир Платонович (RU),
Ширьев Владимир Васильевич (RU),
Чулков Арсений Олегович (RU),
Нестерук Денис Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

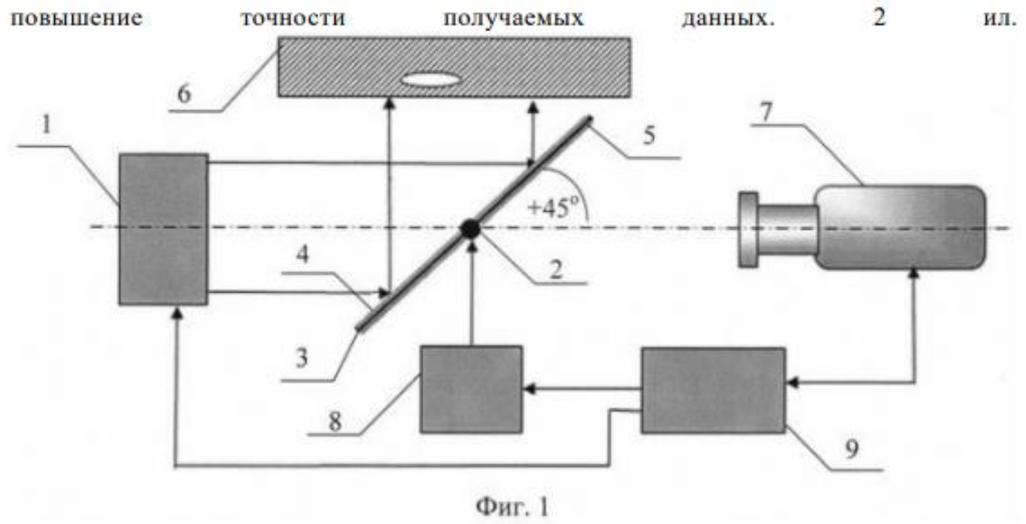
**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет" (RU)**

(54) ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ ДЕФЕКТОСКОП

(57) Реферат:

Изобретение относится к области неразрушающего контроля и может быть использовано для активного одностороннего теплового контроля металлических, композиционных и др. материалов. Тепловизионный дефектоскоп содержит оптический нагреватель для тепловой стимуляции объекта контроля, тепловизор, компьютер, поворотный привод, поворотное зеркало, изготовленное из плоского теплоизоляционного основания и двух полированных металлических пластин, например, из алюминия или меди, закрепленных по обе стороны от теплоизоляционного основания. В заявленном устройстве используется поворотное зеркало, которое в период нагрева объекта контроля устанавливается под углом наклона, равным $+45^\circ$, между нормалью к поверхности поворотного зеркала и нормалью к поверхности объекта контроля и под углом наклона, равным -45° , в период регистрации температурного поля объекта контроля тепловизором, что обеспечивает максимально возможную плотность мощности нагрева и отсутствие геометрических искажений изображения объекта контроля. Технический результат -

30.01.2017



30.01.2017

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 2 575 798 (13) C1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК

G01N 25/00 (2006.01)

G01J 5/60 (2006.01)

H04N 5/33 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 29.02.2016)
Пошлина: учтена за 3 год с 31.12.2016 по 30.12.2017

(21)(22) Заявка: 2014154336/28, 30.12.2014(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.12.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.12.2014

(45) Опубликовано: 20.02.2016 Бюл. № 5(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2090976 C1, 20.09.1997. RU
2348044 C1, 27.02.2009. RU 2012155 C1,
30.04.1994. RU 49664 U1, 27.11.2005. WO
2013133470 A1, 12.09.2013.

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, НИ
Томский политехнический университет,
отдел правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

**Вавилов Владимир Платонович (RU),
Ширяев Владимир Васильевич (RU),
Чулков Арсений Олегович (RU),
Лариошина Ирина Анатольевна (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет" (RU)**

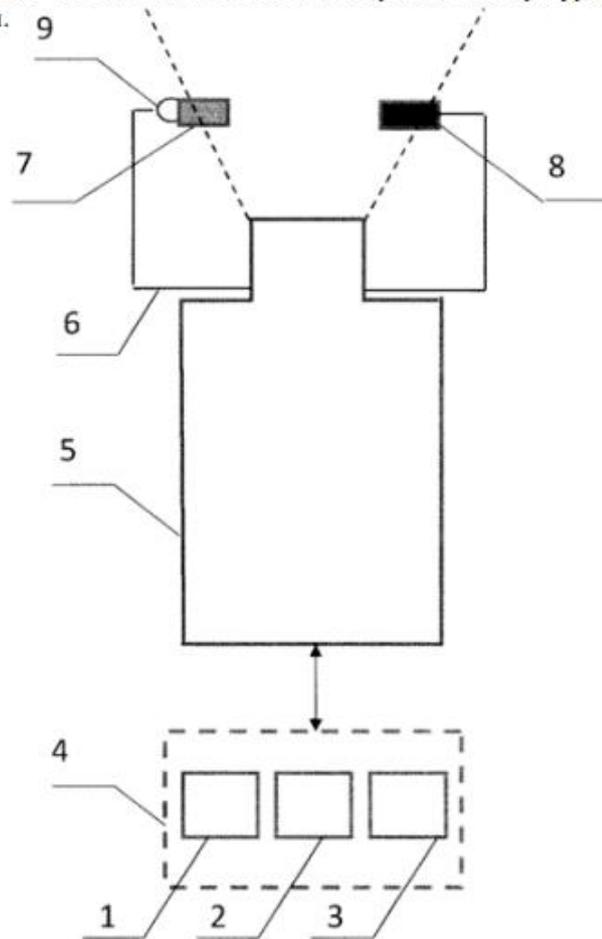
(54) ТЕПЛОВИЗИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАРУЖНОЙ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области неразрушающего контроля и может быть использовано при проведении наружной тепловизионной съемки для диагностики состояния строительных сооружений и энергетических объектов. Тепловизионная система для проведения наружной тепловизионной съемки содержит блок обработки - микропроцессорный контроллер, блок памяти и блок визуализации, представляющие собой компьютер, тепловизор и устройство для определения температурных параметров окружающей среды, состоящее из двух пластин, выполненных из материалов с разными коэффициентами отражения и поглощения. Повышение точности измерения температурных значений объекта контроля достигается путем их корректировки в соответствии с измеренными температурными значениями окружающей среды, регистрируемыми двумя пластинами и принимаемыми как

30.01.2017

эталонные. Технический результат - повышение точности измерения температурных значений объекта контроля. 1 ил.



Фиг. 1

30.01.2017

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 549 549** ⁽¹³⁾ **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК

[G01N 25/18 \(2006.01\)](#)

[G01J 5/60 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: прекратил действие, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса: 28.11.2016)

(21)(22) Заявка: [2014111713/28](#), 26.03.2014(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.03.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 26.03.2014

(45) Опубликовано: [27.04.2015](#) Бюл. № [12](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: PHILIPPI I, BATSALE J.-C., MAILLET D., DEGOVANNI A., "MEASUREMENT OF THERMAL DIFFUSIVITIES THROUGH PROCESSING OF INFRARED IMAGES", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 1995, VOL.66(1), N1, стр.182-192. ВАВИЛОВ В.В., ТОРГУНАКОВ В.Г., НЕСТЕРУК Д.А., МАРИНЕТТИ С. и др., "ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ИК ТЕРМОГРАФИИ", ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА, 2006, Т.309, N2, стр.130-
134. RU 2502989 C1, 27.12. 2013. RU
2379668 C1, 20.01.2010. US 6542849 B2,
01.04.2003. US 7419298 B2, 02.09.2008

Адрес для переписки:

634050, г.Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
отдел правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

**Вавилов Владимир Платонович (RU),
Чудков Арсений Олегович (RU),
Ширяев Владимир Васильевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный исследовательский
Томский политехнический университет"
(RU)**

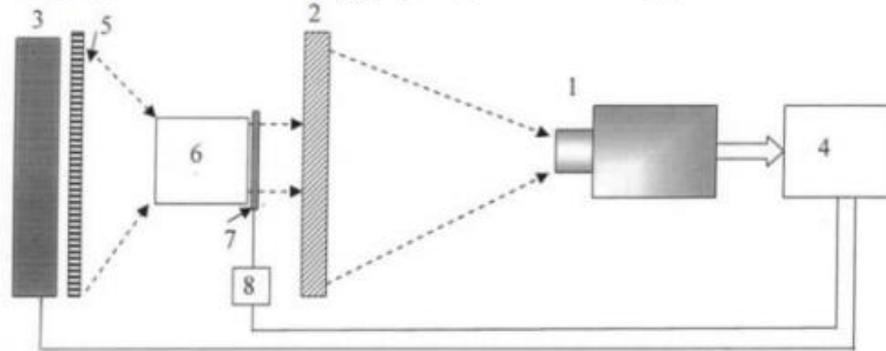
(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

(57) Реферат:

Изобретение относится к бесконтактным методам исследований теплофизических характеристик твердых тел и может быть использовано для исследований

30.01.2017

теплофизических характеристик изделий, используемых в авиакосмической, машиностроительной и энергетической промышленности. Устройство для бесконтактного определения коэффициента температуропроводности твердых тел содержит плоский оптический нагреватель и тепловизор, подключенные к компьютеру, оптически непрозрачную маску для формирования пространственного поля нагрева. Устройство также дополнительно содержит оптический объектив, предназначенный для фокусирования теплового излучения плоского оптического нагревателя и оптически непрозрачную шторку, позволяющую открывать и закрывать тепловое излучение плоского оптического нагревателя в определенные моменты времени. Технический результат - повышение точности бесконтактного определения коэффициента температуропроводности твердых тел. 1 ил.



Фиг.1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **144 096** ⁽¹³⁾ **U1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[G01N 25/00 \(2006.01\)](#)

(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ

прекратил действие, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса:
Статус: 17.02.2016)

(21)(22) Заявка: [2014109567/28](#), 12.03.2014(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.03.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.03.2014

(45) Опубликовано: [10.08.2014](#) Бюл. № [22](#)

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
отдел правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

**Вавилов Владимир Платонович (RU),
Чудков Арсений Олегович (RU),
Ширяев Владимир Васильевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

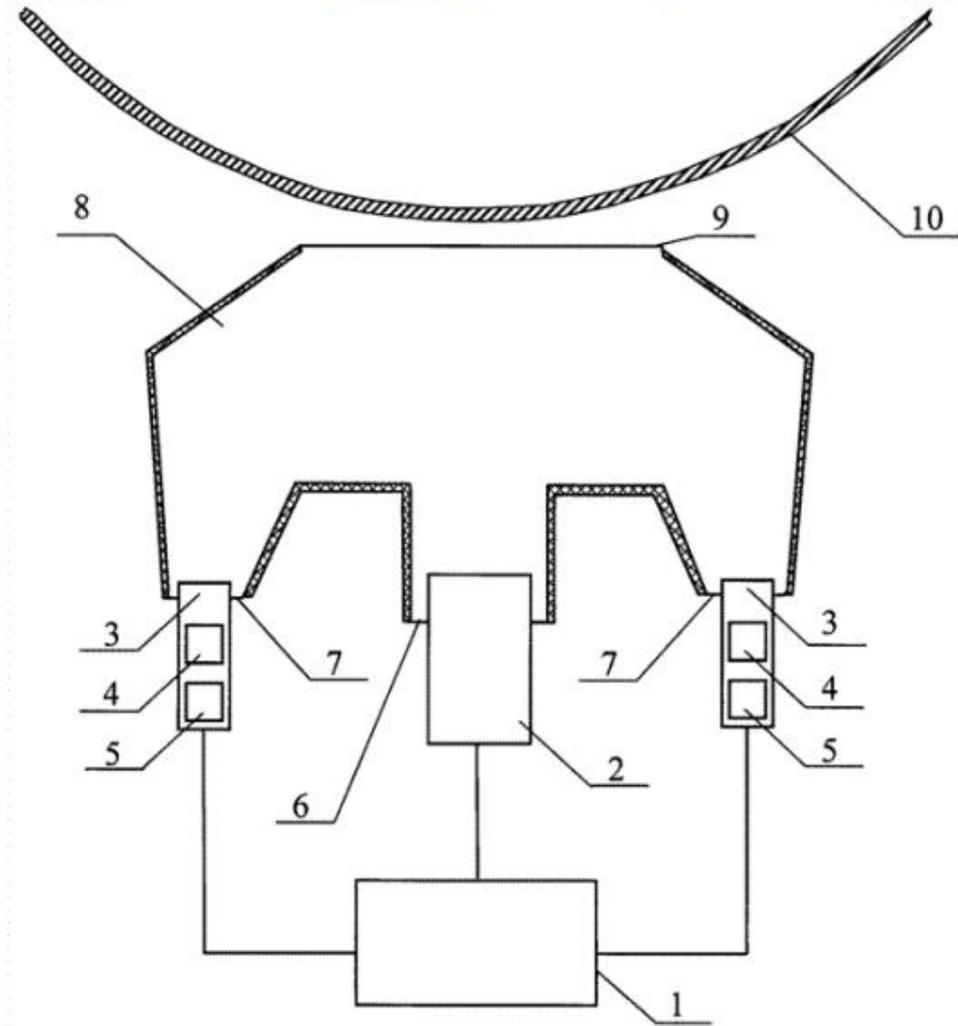
**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный исследовательский
Томский политехнический университет"
(RU)**

(54) ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП

Формула полезной модели

Тепловой дефектоскоп для активного теплового неразрушающего контроля объектов, содержащий воздушные нагреватели для тепловой стимуляции контролируемого объекта, включающие электрические резистивные элементы и вентиляторы, а также тепловизор, соединенные с компьютером, управляющим процессом нагрева и записи термограмм, отличающийся тем, что тепловой дефектоскоп дополнительно содержит камеру смешивания тепловых потоков воздушных нагревателей для обеспечения равномерного воздушного нагрева контролируемого объекта, причем камера смешивания тепловых потоков содержит не менее четырех технологических отверстий, из которых не менее двух технологических отверстий предназначены для ввода воздушных потоков, одно отверстие предназначено для вывода смешанного воздушного потока нагрева контролируемого объекта и одно отверстие предназначено для визирования объекта контроля тепловизором, а электрические резистивные элементы и вентиляторы

раздельно подключены к компьютеру.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **142 185** ⁽¹³⁾ **U1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[G01N 25/00 \(2006.01\)](#)

(12) **ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ**

Статус: прекратил действие, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса: 18.01.2016)

(21)(22) Заявка: [2013153546/28](#), 03.12.2013(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
03.12.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.12.2013

(45) Опубликовано: [20.06.2014](#) Бюл. № 17

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
отдел правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

**Вавилов Владимир Платонович (RU),
Чулков Арсений Олегович (RU),
Ширяев Владимир Васильевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный исследовательский
Томский политехнический университет"
(RU)**

(54) **ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

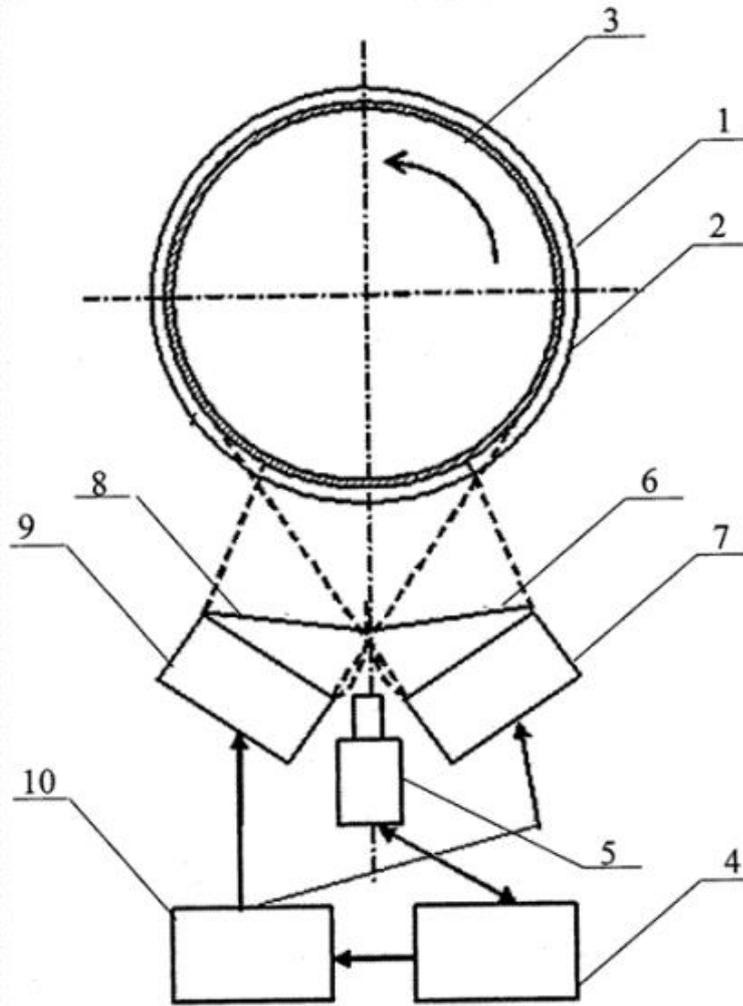
Формула полезной модели

Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля цилиндрических металлических изделий, содержащий управляемые лампы для тепловой стимуляции контролируемых изделий, тепловизор, компьютер, расположенные с наружной стороны контролируемых цилиндрических металлических изделий, отличающийся тем, что тепловой дефектоскоп дополнительно содержит устройство вращения, соединенное с испытательным столом и расположенным на испытательном столе контролируемым цилиндрическим металлическим изделием, устройство вращения соединено с компьютером, соединенным с тепловизором, а лампы для тепловой стимуляции подключены к блоку питания ламп, соединенным с компьютером, программно-управляемые оптически-непрозрачные шторки ламп для тепловой стимуляции выполнены с возможностью открытия светового потока нагрева при включении ламп для тепловой стимуляции и его перекрытия после выключения ламп

для

тепловой

стимуляции.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2020619856

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2020619856</p> <p>Дата регистрации: 25.08.2020</p> <p>Номер и дата поступления заявки: 2020618598 07.08.2020</p> <p>Дата публикации: 25.08.2020</p> <p>Контактные реквизиты: 634050, Томск, пр-кт Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности, Батуриной А.А.; +73822606494; oporid@tpu.ru</p>	<p>Авторы: Суханов Михаил Сергеевич (RU), Вавилов Владимир Платонович (RU), Чулков Арсений Олегович (RU), Дерусова Дарья Александровна (RU)</p> <p>Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)</p>
--	---

Название программы для ЭВМ:
THERMOSON

Реферат:

Программа предназначена для теплового неразрушающего контроля с численным моделированием теплопереноса в твердых телах, подвергнутых тепловой и механической стимуляции и может применяться для анализа процедуры контроля, в том числе в составе программного обеспечения дефектоскопических систем авиакосмической и ракетной техники. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: создание трехмерной модели однослойного образца, содержащего до девяти плоских дефектов; моделирование процесса внутреннего трения в дефектах и передачи тепловых аномалий на поверхность твердого тела; моделирование процесса распространения трехмерных ультразвуковых гармонических колебаний с учетом наличия границ твердого тела и дефектов; выдачу результатов расчета в графическом и табличном виде, а также в виде последовательности тепловых изображений и карт амплитуды ультразвуковых колебаний. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows XP/Vista/7/8/10.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 1265 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2020619186

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2020619186</p> <p>Дата регистрации: 13.08.2020</p> <p>Номер и дата поступления заявки: 2020618447 05.08.2020</p> <p>Дата публикации: 13.08.2020</p> <p>Контактные реквизиты: 634050, г. Томск, пр-кт Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности, Батуриной А. А.; 73822606494, oporid@tpu.ru</p>	<p>Авторы: Чулков Арсений Олегович (RU), Нестерук Денис Алексеевич (RU), Вавилов Владимир Платонович (RU)</p> <p>Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)</p>
---	---

Название программы для ЭВМ:
THERMO_NN

Реферат:

Программа предназначена для автоматизированной обработки результатов испытаний материалов и изделий методом активного теплового неразрушающего контроля и может применяться в составе тепловых дефектоскопических систем авиакосмической и ракетной техники. Обеспечивает выполнение следующих функций: автоматизированное обнаружение подповерхностных дефектов в образцах, на обработку результатов контроля которых была обучена нейронная сеть; определение глубины залегания выявленных дефектов, а также поперечных размеров и площади тепловой аномалии в дефектной области; определение координат расположения центра каждой из выявленных дефектных областей; выдача результирующей бинарной карты дефектов; выдача численных параметров по каждому из выявленных дефектов. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК. ОС: Windows XP/Vista/7/8/10.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 143 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2020612786**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2020612786

Дата регистрации: 03.03.2020

Номер и дата поступления заявки:
2020611778 21.02.2020

Дата публикации и номер бюллетеня:
03.03.2020 Бюл. № 3

Контактные реквизиты:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАОУ
ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
отдел правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности,
Матвиенко В.В., oporid@tpu.ru,
8(3822)606-494

Автор(ы):

Шпильной Виктор Юрьевич (RU),
Дерусова Дарья Александровна (RU),
Чулков Арсений Олегович (RU)

Правообладатель(и):

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков

Реферат:

Программа предназначена для поиска дефектов на графических изображениях, получаемых в результате работы программного обеспечения трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра PSV-400-3D фирмы «Polytec» (Германия). Результатом работы программы является изображение дефекта(ов) на белом фоне, а также (опционально) площадь этого дефекта. Программа может применяться для обработки изображений, полученных в результате неразрушающего контроля различных объектов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: - рамочное кадрирование изображения; - попиксельное сравнение цветовых (черно-белых) оттенков с выбранным оператором диапазоном; - обесцвечивание (забеление) бездефектной области; - расчет пиксель-миллиметрового соотношения, исходя из указанных оператором величины (в миллиметрах) и длины отрезка (в пикселях, инструмент в приложении); - расчет площади дефектной области. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК. ОС: Windows XP/2003/Vista/7/8/8.1/10.

Язык программирования: C#, Assembler

Объем программы для ЭВМ: 593 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2018615349

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

[2018615349](#)

Дата регистрации: **07.05.2018**

Номер и дата поступления заявки:

2018612678 21.03.2018

Дата публикации: [07.05.2018](#)

Контактные реквизиты:

**634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет»,
отдел правовой охраны
результатов интеллектуальной
деятельности; e-mail:
abataba@tpu.ru; тел.: +7(382)
260-64-94**

Авторы:

**Чулков Арсений Олегович (RU),
Нестерук Денис Алексеевич (RU),
Вавилов Владимир Платонович (RU)**

Правообладатель:

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)**

Название программы для ЭВМ:

Автоматизированная идентификация дефектов в инфракрасных термограммах

Реферат:

Программа предназначена для автоматизированного обнаружения скрытых дефектов в материалах и изделиях методом активного теплового неразрушающего контроля и может применяться в составе тепловых дефектоскопических систем при испытании материалов и изделий авиакосмической и ракетной техники. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: обнаружение минимальных/максимальных значений температуры в инфракрасных термограммах и классификация их как дефектных/бездефектных областей в зависимости от процедуры контроля; анализ пикселей, примыкающих к выявленной дефектной области, с целью захвата «дефектных» пикселей с уровнем температурного сигнала, превышающим заданный порог; определение поперечных размеров и расчет площади выявленной дефектной области; выдача результирующей бинарной карты дефектов с учетом диффузионного распространения тепла.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 813 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2018615919

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2018615919</p> <p>Дата регистрации: 18.05.2018</p> <p>Номер и дата поступления заявки: 2018613299 05.04.2018</p> <p>Дата публикации: 18.05.2018</p> <p>Контактные реквизиты: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности, abataba@tpu.ru, +7(3822)606-494</p>	<p>Авторы: Суханов Михаил Сергеевич (RU), Симонова Ольга Сергеевна (RU), Вавилов Владимир Платонович (RU), Чулков Арсений Олегович (RU)</p> <p>Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)</p>
---	---

Название программы для ЭВМ:

Расчет температурных полей в анизотропных телах с внутренними источниками тепловыделения

Реферат:

Программа предназначена для вычисления трехмерных температурных распределений в шестислойных анизотропных твердых телах, содержащих до девяти внутренних источников тепловыделения (дефектов), и может применяться в составе тепловых дефектоскопических систем при испытании материалов и изделий авиакосмической и ракетной техники. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: моделирование неравномерного поверхностного нагрева гауссовским источником тепла; анализ пикселей, примыкающих к выявленной дефектной области, с целью захвата «дефектных» пикселей с уровнем температурного сигнала, превышающим заданный порог; выделение слабых различий во временном развитии температурных сигналов в различных точках изделия; определение поперечных размеров и расчет площади выявленной дефектной области.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 813 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

2021664038

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2021664038

Дата регистрации: **30.08.2021**

Номер и дата поступления заявки:
2021663083 19.08.2021

Дата публикации: **30.08.2021**

Контактные реквизиты:
oporid@tpu.ru, 8(3822)606-494

Авторы:

**Чулков Арсений Олегович (RU),
Нестерук Денис Алексеевич (RU),
Вавилов Владимир Платонович (RU)**

Правообладатель:

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)**

Название программы для ЭВМ:
THERMOSCAN

Реферат:

Программа предназначена для преобразования результатов теплового контроля, полученных методом сканирования, в последовательности термограмм и их автоматизированной обработки для обнаружения дефектов и определения их параметров. Программа может применяться в составе тепловых дефектоскопов при испытании композиционных материалов и теплозащиты крупногабаритных изделий авиакосмической и ракетной техники. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: построчное преобразование динамических температурных полей движущихся объектов в последовательности панорамных термограмм; автоматизированное обнаружение подповерхностных дефектов с помощью нейронных сетей; определение глубины залегания дефектов по анализу изменения температуры во времени; определение пространственных координат, поперечных размеров и площади дефектов; выдача карты дефектов с их численными параметрами. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows 7/8/10.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 1021 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU **2021663926**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
[2021663926](#)

Дата регистрации: **26.08.2021**

Номер и дата поступления заявки:
2021663052 19.08.2021

Дата публикации: [26.08.2021](#)

Контактные реквизиты:
e-mail: oporid@tpu.ru, тел.:
8(3822)606-494

Авторы:

**Чулков Арсений Олегович (RU),
Нестерук Денис Алексеевич (RU),
Вавилов Владимир Платонович (RU)**

Правообладатель:

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (RU)**

Название программы для ЭВМ:
THERMOFUSION

Реферат:

Программа предназначена для слияния данных, полученных по результатам теплового неразрушающего контроля при ультразвуковом и оптическом видах нагрева. Программа может применяться в составе тепловых дефектоскопов при комбинированном контроле изделий авиакосмической и ракетной техники. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: слияние данных, полученных при тепловом контроле с использованием ультразвукового и оптического видов нагрева; выполнение корректировки изображения объекта контроля; выполнение пространственной сшивки последовательностей термограмм; автоматизированное обнаружение дефектов, а также их классификация с помощью обученной нейронной сети; определение глубины залегания дефектов; определение пространственных координат, поперечных размеров и площади дефектов; выдачу результирующей карты дефектов; выдачу численных параметров выявленных дефектов. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК. ОС: Windows 7/8/10.

Язык программирования: C#

Объем программы для ЭВМ: 1021 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

2022662013

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2022662013	Авторы: Чулков Арсений Олегович (RU), Нестерук Денис Алексеевич (RU), Вавилов Владимир Платонович (RU)
Дата регистрации: 29.06.2022	Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)
Номер и дата поступления заявки: 2022661821 29.06.2022	
Дата публикации: 29.06.2022	
Контактные реквизиты: ip2022@tpu.ru	

Название программы для ЭВМ:
THERMO_Visual

Реферат:

Программа предназначена для сбора и обработки результатов одновременного тепловизионного и оптического контроля и может входить в пакет программ тепловизионных дефектоскопов для контроля материалов и изделий авиакосмической и ракетной техники. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: - получение данных с тепловизионной и оптической камер и их сохранение; - одновременный вывод изображений с тепловизионной и оптической камер; - обработка полученных данных с наложением изображений с тепловизионной и оптической камер.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 332 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU **2022662003**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2022662003	Авторы: Чулков Арсений Олегович (RU), Нестерук Денис Алексеевич (RU), Вавилов Владимир Платонович (RU), Суханов Михаил Сергеевич (RU)
Дата регистрации: 29.06.2022	
Номер и дата поступления заявки: 2022661788 29.06.2022	
Дата публикации: 29.06.2022	Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)
Контактные реквизиты: ip2022@tpu.ru	

Название программы для ЭВМ:
THERMOCalc_НС

Реферат:

Программа предназначена для моделирования трехмерных динамических тепловых процессов в твердых телах со структурными неоднородностями под действием циклического нагрева и охлаждения и может входить в пакет программ тепловизионных дефектоскопов для предварительного определения параметров тепловизионного контроля материалов и изделий авиакосмической и ракетной техники. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: - задание теплофизических характеристик контролируемых материалов, а также структурных дефектов; - численное моделирование температурных распределений в дефектных областях как функции от времени; - задание длительности, мощности и периодичности тепловых импульсов, - визуализацию полученных результатов в виде карт тепловых полей.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 354 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

2023660384ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**Номер регистрации (свидетельства):
2023660384Дата регистрации: **19.05.2023**Номер и дата поступления заявки:
2023619873 19.05.2023Дата публикации и номер бюллетеня:
19.05.2023 Бюл. № 5Контактные реквизиты:
**e-mail: ip2022@tpru.ru Номер
телефона: +7 (3822) 606-494**

Авторы:

**Ширяев Владимир Васильевич (RU),
Чулков Арсений Олегович (RU),
Вавилов Владимир Платонович (RU)**

Правообладатель:

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (RU)**Название программы для ЭВМ:
ThermoWaves_NDT**Реферат:**

Программа предназначена для создания режимов волнового нагрева объектов исследования оптическими излучателями и может входить в пакет программ тепловизионных дефектоскопов для контроля материалов и изделий авиакосмической и ракетной техники. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: - установка количества периодов нагрева; - установка длительности периода нагрева; - выбор формы инициирующего сигнала.

Язык программирования: C++**Объем программы для ЭВМ: 671 Кб**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

2023688527ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2023688527 Дата регистрации: 22.12.2023 Номер и дата поступления заявки: 2023688523 22.12.2023 Дата публикации и номер бюллетеня: 22.12.2023 Бюл. № 1 Контактные реквизиты: e-mail: ip2022@tpru.ru , тел.: 8(3822)606-494	Авторы: Суханов Михаил Сергеевич (RU), Вавилов Владимир Платонович (RU), Чулков Арсений Олегович (RU) Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)
---	--

Название программы для ЭВМ:
ThermoCalc-3D Pro

Реферат:

Программа предназначена для численного моделирования трехмерных задач теплового неразрушающего контроля в многослойных твердых телах, содержащих до шестидесяти дефектов, с возможностью выбора профиля нагрева, может входить в пакет программ тепловизионных дефектоскопов и применяться в учебном процессе и научных исследованиях. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: - создание трехмерной модели образца с тридцатью шестью слоями; - моделирование в одном образце до шестидесяти дефектов в виде параллелепипедов с различными теплофизическими свойствами; - моделирование нагрева образца с помощью уникального профиля, реализующего произвольную функцию нагрева во времени и пространстве; - выдача результатов моделирования в графическом (в том числе трехмерном) и табличном виде, а также в виде последовательности тепловых изображений.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 8,6 Мб

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты об использовании результатов диссертационной работы, отзывы на работу

**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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
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



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности
Томского политехнического университета

М.А. Соловьев

« 7 » декабря 2024 г.

АКТ

использования результатов диссертационного исследования
Чулкова Арсений Олеговича

Комиссия в составе:

1. Председатель комиссии: Баранов П.Ф., к.т.н., директор Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности;
2. Член комиссии: Иванова В.С., к.т.н., доцент Отделения электронной инженерии;
3. Член комиссии: Коломейцев А., к.т.н., доцент Отделения электронной инженерии

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Чулкова А.О. «Методы и аппаратура активного теплового неразрушающего контроля композиционных и многослойных структур», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды используются в образовательном процессе направлений 11.03.04 и 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» при выполнении выпускных квалификационных работ.

Председатель комиссии

П.Ф. Баранов

Члены комиссии

В.С. Иванова

А. Коломейцев

Акционерное общество
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ
СПЕЦИАЛЬНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ»

ул.Заводская, д. 34, г.Хотьково, Сергиево-Посадский г.о.,
Московская обл., 141371
тел.8-495-993-00-11, факс 8-496-543-82-94
e-mail: tsniism@tsniism.ru
http://www.tsniism.ru
ИНН/КПП 5042003203/ 504201001

№ 294/6-2024
На № _____ от 27.11.2024

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генераль-
ного директора – главный ин-
женер, к.т.н.



Пичугин А.Н.
11 2024г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы

Чулкова Арсений Олеговича

«Методы и аппаратура активного теплового неразрушающего контроля композиционных и многослойных структур»
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Настоящий акт составлен в том, на АО «ЦНИИСМ» при выполнении научно исследовательских и опытно-конструкторских работ по неразрушающему контролю изделий из полимерных композиционных материалов, применялись разработанные в рамках диссертационной работы Чулкова А. О. (на базе Центра промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского Политехнического университета) принципы построения устройств теплового неразрушающего контроля с ультразвуковыми источниками тепловой стимуляции.

Главный научный сотрудник, д.т.н.

Будадин О.Н.



Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-Технический Центр «Эталон»
(ООО «НТЦ «Эталон»)

197343, Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, дом 57, литера А
тел./факс: (812) 640-66-92, (812) 640-66-94
ИНН/КПП 7804420632/781401001,
www.ntc-etalon.spb.ru, e-mail: ntc-etalon@yandex.ru, mail@ntc-etalon.ru

АКТ

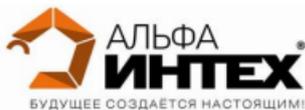
об использовании результатов диссертационного исследования

Настоящий Акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Чулкова Арсения Олеговича, к.т.н., ведущего научного сотрудника Центра промышленной томографии Национального исследовательского Томского Политехнического университета по теме «МЕТОДЫ И АППАРАТУРА АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» были использованы при внедрении и эксплуатации стационарной установки термоакустического контроля дефектов полимерных композиционных материалов и изделий космической техники, поставленной ФГАОУ ВО НИ ТПУ в рамках договора №16.02.03-157/2024у.

Директор ООО «НТЦ «Эталон»



О.В. Краснов



ООО УРТЦ «Альфа-Интех»
454038, г. Челябинск, ул. Ш. Metallургов, 45П, оф.25
ИНН 7460017486 КПП 746001001 БИК 047501602
р/с 40702810972000040444 в ЧЕЛЯБИНСКОМ ОТДЕЛЕНИИ
Н8597 ПАО СБЕРБАНК к/с 30101810700000000602

Акт
использования результатов диссертационного исследования
Чулкова Арсений Олеговича

Настоящим Актом подтверждаем использование результатов диссертационной работы «МЕТОДЫ И АППАРАТУРА АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР», представленной Чулковым Арсением Олеговичем, к.т.н., ведущим научным сотрудником Центра промышленной томографии Томского Политехнического университета на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

В частности, предложенный в диссертации способ тепловизионного сканирования был использован для высокопроизводительного и бесконтактного теплового неразрушающего контроля качества покрытий крупногабаритных цилиндрических изделий ракетно-космической техники, и реализован в составе роботизированной установки, разработанной совместно с ООО УРТЦ «Альфа-Интех».

Генеральный директор ООО УРТЦ «Альфа-Интех»



/А.А. Перепелица./



Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»

ПРОСПЕКТ ЛЕНИНА, 163, КПП 761001001
 РЫБИНСК, ЯРОСЛАВСКАЯ ОБЛ., ОГРН 1027601106169
 РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ, 152903 ИНН 7610052644

Т.: +7 4855 32-81-00 SATURN@UEC-SATURN.RU
 Ф.: +7 4855 32-90-00

WWW.UECRUS.COM/ABOUT/STRUCTURE/PAO-ODK-SATURN/

08.02.2024 № 469/31-36d

На № 16.02/690 от 27.12.2023

Национальный исследовательский
 Томский политехнический
 университет
 Директору Инженерной школы
 неразрушающего контроля и
 безопасности
 П.Ф. Баранову

ул. Савиных, 7, г. Томск,
 634028

О подтверждении использования
 результатов выполненной НИОКР

Уважаемый Павел Федорович!

В ответ на Ваше письмо подтверждаю, что установки для проведения термографического метода неразрушающего контроля с ультразвуковой стимуляцией нагрева разработаны, изготовлены и поставлены Томским политехническим университетом на территорию опытного завода ПАО «ОДК-Сатурн» в соответствии со сроками, указанными в договоре от 19.09.2022 № 469/017-055 (далее – Договор).

Данным письмом выражаю согласие на опубликование материалов об установках, разработанных в рамках Договора для проведения термографического метода неразрушающего контроля с ультразвуковой стимуляцией нагрева на сайте ТПУ, в презентациях и диссертационных работах исполнителей настоящего Договора. Объем и вид материалов, допущенных к опубликованию, – в соответствии с Приложением №2 Вашего письма от 27.12.2023 № 16.02/690.

Первый заместитель генерального
 конструктора – главный конструктор

Р.Ю. Старков

Жуков Олег Михайлович
 +7(4855) 32-61-55



**Федеральное государственное унитарное предприятие
«Сибирский научно-исследовательский институт авиации им.С.А. Чаплыгина»
(ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»)**

Полаунова ул., д. 21, г. Новосибирск, 630051
Тел. (383) 279-01-56
Факс (383) 278-70-01
E-mail: sibnia@sibnia.ru, http://www.sibnia.ru

ОКПО 07541511, ОГРН 1025400530836, ИНН/КПП 5401101598/540101001
р/с 40502810944080100010 в Сибирском банке СБ РФ г. Новосибирск
к/с 30101810500000000641
БИК 045004641

12.09.2019 № 14/2289

На № _____ от _____
О направлении Акта

Начальнику лаборатории
Инженерной школы неразрушающего
контроля и безопасности
Томский политехнический университет

Вавилову В.П.

г. Томск, ул. Савиных, 7
634028

Уважаемый Владимир Платонович!

Направляю Вам Акт результатов научно-исследовательской работы по
контракту № 16.15-358/2017.

Приложение: Акт на 1 л в 1 экз.

Директор

В.Е. Барсук

Брагин Александр Анатольевич
8 (383) 278-70-36

ИШКБ
ВХ. № 535
ОТ 23.09.19

Акт использования результатов научно-исследовательской работы «разработка методики применения активного теплового контроля с использованием оптической и ультразвуковой стимуляции для оперативной дефектоскопии элементов конструкции МВЛ сложной формы из углепластика на этапе их производства» по контракту №16.15-358/2017, выполненной в национальном исследовательском Томском политехническом университете.

г. Новосибирск

«2» 09 2019 г.

Результаты вышеуказанной научно-исследовательской работы по созданию методики контроля элементов авиационной техники, выполненных из углепластиковых композиционных материалов, использованы для проведения неразрушающих испытаний опытных изделий из композитных материалов.

Настоящий акт не предусматривает финансовые обязательства между нашими организациями.

Научный руководитель института
ФГУП «СибНИИ им. С.А. Чаплыгина»



А.Н. Серьезнов

2019 г.





ООО Уральский робототехнологический центр «Альфа-Интех»
454047 г. Челябинск, ул. 2-я Павеловская, 36 оф. 107,
Тел. (351) 245-49-53 (54), факс (351) 200-40-43

ИНН 7460017486 КПП 746001001 ОГРН 1147460005110 р/с 40702810904000003760
в Уральский филиал АО "Райффайзенбанк" г. Екатеринбург к/с 30101810100000000906 БИК 046577906

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО УРТЦ «Альфа-Интех»


В.Я. Щепелин
«30» 10 2017 г.

Акт внедрения результатов научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы, выполненной в Научно-производственной лаборатории «Тепловой контроль» Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета

Результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы, проведенной в Научно-производственной лаборатории «Тепловой контроль» Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета по созданию роботизированной системы теплового неразрушающего контроля сканирующего типа, позволяющей бесконтактно осуществлять испытания крупногабаритных изделий с высокой производительностью и возможностью автоматизированного получения результатов, внедрены совместно с ООО УРТЦ «Альфа-Интех» в производственную линию неразрушающих испытаний изделий ракетно-космической отрасли.

Технический директор



Г.В. Шильников

В конкурсную комиссию на
соискание Премии Правительства РФ
для молодых ученых в области науки
и техники 2022 года

ОТЗЫВ

**на научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу
«Роботизированный тепловой неразрушающий контроль скрытых дефектов
в композиционных материалах и теплозащитных покрытиях авиационной,
космической и ракетной техники», выполненной научным коллективом
Научно-производственной лаборатории «Тепловой контроль»
Национального исследовательского Томского политехнического университета
и выдвинутой на соискание Премии Правительства РФ
для молодых ученых в области науки и техники 2022 года**

Ученые и специалисты Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ») и Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ) на протяжении последних полутора десятков лет успешно сотрудничают в области неразрушающего контроля перспективных материалов и конструкций авиационного назначения. В частности проведены комплексные поисковые исследования по применению панорамных тепловизоров для поиска и локализации малозаметных ударных повреждений на композитных элементах воздушных судов.

Со стороны НИ ТПУ работы по термографическому контролю выполняются коллективом Научно-производственной лаборатории «Тепловой контроль» под руководством В.П. Вавилова. Ими достигнуты значимые для авиационной отрасли результаты по применению физических методов теплового контроля и собственных

разработок в области искусственного интеллекта при создании и внедрении в практику отечественных компьютерных программ для неразрушающих испытаний. Например, данным коллективом совместно со специалистами ФАУ «ЦАГИ» разработаны методика анализа прочностных характеристик полимерных композиционных материалов на основе анализа их теплофизических характеристик.

По заданию ФАУ «ЦАГИ» исследователями НИ ТПУ разработан портативный тепловой дефектоскоп для дистанционной регистрации динамических температурных полей образцов из композиционных материалов при проведении стендовых испытаний на вибрационную прочность. Использование данного устройства позволило в безопасном режиме исследовать процесс разрушения при действии механических нагрузок.

Исследования научного коллектива, руководимого профессором В.П. Вавиловым и его учеником А.О. Чулковым, вносят значительный вклад в развитие теплового неразрушающего контроля в России и помогают решению важных задач контроля качества многослойных композиционных материалов современных отечественных летательных аппаратов.

Разрабатываемые в Научно-производственной лаборатории НИ ТПУ «Тепловой контроль» тепловизионные дефектоскопические комплексы, в том числе роботизированные и самоходные, являются уникальными для нашей страны и могут быть рекомендованы для применения в неразрушающих испытаниях образцов и элементов конструкций не только авиационного назначения, но и для других отраслей транспортного машиностроения.

Прошу считать настоящий отзыв поддержкой ФАУ «ЦАГИ» заявки от НИ ТПУ – научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе «Роботизированный тепловой неразрушающий контроль скрытых дефектов в композиционных материалах и теплозащитных покрытиях авиационной, космической и ракетной техники» (авторский коллектив: В.П. Вавилов и А.О. Чулков), представленной на соискание Премии Правительства Российской Федерации для молодых ученых в области науки и техники 2022 года.

Научный руководитель института,
академик РАН



Чернышев С.Л.

25.04.2022

Акционерное общество
**«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
 НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ИНСТИТУТ
 СПЕЦИАЛЬНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ»**
 (АО «ЦНИИСМ»)

ул.Заводская, г.Хотьково, Московская обл., 141371
 Тел.993-00-11, факс 8 (49654) 3-82-94
 e-mail: tsniism@tsniism.ru
<http://www.tsniism.ru>
 ИНН/КПП 5042003203/504201001

« _____ » _____ 2022г. № _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
 директора главного конструктора
 Акционерного общества «Центральный
 научно-исследовательский институт
 специального машиностроения»,
 д.т.н., профессор, Лауреат
 Государственной премии СССР, премии
 Правительства Российской Федерации,
 премии Ленинского комсомола,
 Заслуженный деятель науки РФ,
 почетный работник промышленности
 Кульков А. А.
 « 20 _____ » 2022г.



ОТЗЫВ

на работу

**«РОБОТИЗИРОВАННЫЙ ТЕПЛОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
 СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И
 ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ АВИАЦИОННОЙ, КОСМИЧЕСКОЙ И
 РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ»**

выдвинутую научным коллективом Научно-производственной лаборатории
 «Тепловой контроль» Национального исследовательского Томского
 политехнического университета
 на соискание Премии Правительства РФ для молодых ученых в области науки и
 техники 2022 года

Научный коллектив Лаборатории теплового контроля в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (НИ ТПУ) под руководством д.т.н., профессора В.П. Вавилова является одним из наиболее известных в России научных коллективов, работающих в области теплового неразрушающего контроля. В результате многолетних исследований разработаны методики и аппаратуры для тепловизионной диагностики в промышленности и контроля композиционных материалов в авиационной и аэрокосмической технике.

В частности, коллективом разработаны устройства и методики нового метода неразрушающих испытаний, а именно, ультразвуковой инфракрасной термографии композитов, позволяющей обнаруживать трещины и расслоения в композиционных материалах, которые не выявляются традиционным ультразвуковым контролем.

Коллектив АО «Центральный Научно-исследовательский институт специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ»), работающая в той же области неразрушающих испытаний, имеет долгосрочное научное сотрудничество с коллективом НИ ТПУ, включая совместные научные публикации в высокорейтинговых международных журналах.

Последние работы научного коллектив НИ ТПУ, включающего соискателей Премии Правительства РФ для молодых ученых в области науки и техники 2022 года А.О. Чулкова и В.П. Вавилова, относятся к разработке роботизированных тепловых дефектоскоп и использованию нейронных сетей для обработки результатов контроля, что направлено на автоматизацию процедуры контроля и являются актуальными при испытаниях крупногабаритных ответственных объектов, а также изделий сложной формы, используемых в авиационной и ракетно-космической промышленности.

Разработанный метод позволяет выявлять влагу в сотовых конструкциях авиационной техники, а также неоднородности в композиционных материалах в виде разнородных включений и воздушных полостей Объем внедрения методик, программ и устройств для ТК композитов составляет более 120 млн. рублей.

Экономический эффект разработки заключается в повышении качества ответственных и дорогостоящих элементов и деталей высокотехнологичной техники.

Социальный эффект результатов проводимых исследований состоит в снижении вероятности отказов авиационной и ракетно-космической техники, а также в подготовке высококвалифицированных кадров в области ТК.

Коллектив регулярно экспонирует образцы дефектоскопов на научно-технических выставках, демонстрируя готовность разработок для практического использования.

Разработанные устройства не имеют аналогов в России и не уступают зарубежным аналогам, а по набору встроенных алгоритмов обработки инфракрасных термограмм превосходят их.

Результаты работы имеют широкое внедрение на различных предприятиях России.

АО «ЦНИИСМ» поддерживает выдвижение вышеупомянутой работы на соискание Премии Правительства РФ для молодых ученых в области науки и техники 2022.

Главный научный сотрудник, Лауреат государственной Премии РФ и Премии Правительства РФ в области науки и техники, доктор технических наук


О.Н. Будадин

«20» 04 2022г.

Подпись доктора технических наук, Будадина Олега Николаевича заверяю
Секретарь НТС АО «ЦНИИСМ»


Краснова Г.В.

«20» 04 2022г.





**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГУБЕРНАТОРА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ
ПО НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМУ КОМПЛЕКСУ
И ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

Ленина пл., д. 6, г. Томск, 634050, тел./факс (382 2) 510-619, тел. (382 2) 510-818
E-mail: edu@tomsk.gov.ru, http://www.tomsk.gov.ru, телеграф Томск-50
ОКПО 44239015, ОГРН 1027000918218, ИНН/КПП 7017069388/701701001

09.02.2022 № 10-35-063
на № _____ от _____

О поддержке цикла работ авторского коллектива ТПУ на премию Правительства РФ

Министерство
науки и высшего образования
Российской Федерации

Администрация Томской области поддерживает цикл работ «Роботизированный тепловой неразрушающий контроль скрытых дефектов в композиционных материалах и теплозащитных покрытиях авиационной, космической и ракетной техники», выдвигаемый на соискание премии Правительства Российской Федерации 2022 года в области науки и техники для молодых ученых.

Цикл работ представлен научным коллективом Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ) в составе: *Вавилова Владимира Платоновича*, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, доктора технических наук, заведующего научно-производственной лабораторией «Тепловой контроль» Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности и *Чулкова Арсения Олеговича*, кандидата технических наук, старшего научного сотрудника Центра промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности.

Цикл научных работ посвящен исследованиям в области активного теплового неразрушающего контроля композиционных материалов и теплозащитных покрытий. В работах Цикла описаны новые методы, программные алгоритмы, а также аппаратура теплового контроля, направленные на обнаружение производственных и эксплуатационных дефектов изделий из угле- и стеклопластиков, углерод-углеродных композитов, а также многослойных структур металл-теплозащита. Ряд работ Цикла посвящены автоматизации процедур теплового контроля композитов. Исследования в данных направлениях связаны с использованием роботизированной техники и искусственного интеллекта как современных средств повышения эффективности неразрушающих испытаний.

Результаты исследований научного коллектива вносят значительный вклад в развитие методов неразрушающего контроля композиционных материалов, используемых в авиационной и ракетно-космической технике. Они имеют мировое признание и определяют лидирующее положение научной группы в России в области

теплового неразрушающего контроля, что демонстрирует высокий уровень научных исследований, проводимых в организациях Томского научно-образовательного комплекса.

Результаты научных исследований выдвигаемого коллектива востребованы российскими и зарубежными институтами и предприятиями, относящимися к авиационной и ракетно-космической промышленности, что подтверждено контрактами с такими организациями, как ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского» (г. Жуковский), СибНИА им. С.А. Чаплыгина (г. Новосибирск), ГосНИИ гражданской авиации (г. Москва), АО «Красмаш» (г. Красноярск) и др.

Актуальность и новизну полученных исследований подтверждают более 150 научных работ, опубликованных с 2011 года, в том числе, более 50 работ в высокорейтинговых международных журналах, а также 3 монографии. Получено 18 патентов на изобретения, 12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Вклад в развитие науки руководителем коллектива В.П. Вавиловым отмечен рядом высоких наград, в частности: Нагрудным знаком «Почетный работник высшего и профессионального образования РФ» Минобрнауки РФ; Премией Правительства РФ в области науки и техники за создание и внедрение средств неразрушающего контроля и диагностики для обеспечения техногенной и антитеррористической деятельности; званием «Заслуженный деятель науки РФ»; медалью Минобрнауки РФ «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технологического развития» и др. Результаты научных исследований А.О. Чулкова отмечены наградами: Лауреат молодежной премии Российского союза научных и инженерных общественных объединений в области науки и техники «Надежда России», Нагрудный знак «Молодой ученый» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Считаем, что представленный цикл работ «Роботизированный тепловой неразрушающий контроль скрытых дефектов в композиционных материалах и теплозащитных покрытиях авиационной, космической и ракетной техники» заслуживает высокой оценки со стороны Правительства Российской Федерации, а его авторы – Вавилов В.П. и Чулков А.О. - присуждения премии Правительства Российской Федерации 2022 года в области науки и техники для молодых ученых.

Л.М. Огородова

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Разработанные методики проведения ТНК

МЕТОДИКА ТНК КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СПОСОБОМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО СКАНИРОВАНИЯ

Следует отметить, что Соискатель под разработкой методики подразумевает не создание регламентирующего документа, утвержденного соответствующим органом, но разработку последовательности действий, обеспечивающей оптимальный режим ТНК крупногабаритных цилиндрических изделий способом тепловизионного сканирования с применением разработанного роботизированного устройства (патент РФ №2697437С1) и соответствующего программного обеспечения ThermoScan (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021664038). Настоящая методика адаптирована из документа «Способ теплового неразрушающего контроля крупногабаритных цилиндрических изделий», патент РФ №2774040С1.

Объект контроля

Объектом ТНК являются крупногабаритное цилиндрическое изделие (диаметром от 1 м и длиной от 7 м), изготовленное из металла с нанесенным на него полимерным теплозащитным покрытием толщиной до 12 мм, с коэффициентом излучения поверхности не ниже 0,7 и без его механического загрязнения.

Обнаруживаемые дефекты: внутренние расслоения и полости покрытия, неравномерность толщины, инородные включения, а также отслоение покрытия от металлического основания.

Цель контроля

Цель НК состоит в обнаружении вышеупомянутых дефектов бесконтактным способом с высокой производительностью (не ниже 20 м² в час) в условиях производства, т.е. непосредственно после нанесения покрытия, либо после длительного хранения объекта контроля.

Общие требования к проведению ТНК

Настоящая методика относится к процедуре ТНК, включающей линейный нагрев контролируемой поверхности с использованием источника, например, резистивного типа, и одновременную регистрацию температуры с помощью тепловизора. Источник нагрева и тепловизор размещены на роботизированном манипуляторе с возможностью их перемещения вдоль продольной оси цилиндрического объекта контроля, изменения положения относительно друг друга и контролируемой поверхности. Выбор типа источника нагрева проводят исходя из требований производительности контроля (принимая во внимание ограничение длины доступных галогенных ламп и достижимой равномерности конвекционных нагревателей), а его мощность регулируют с учетом допустимых температур для конкретных материалов контролируемых покрытий. Для реализации перемещения контролируемой поверхности относительно средств контроля, цилиндрическое изделие вращают вокруг его продольной оси с помощью приводных роликов горизонтально ориентированной рамы.

Средства контроля и оцениваемые характеристики

Оцениваемыми характеристиками, как и в случае классической односторонней процедуры ТНК, являются амплитуды температурных сигналов ΔT и контрастов C , время появления их максимумов τ_m , величины отношений сигнал/шум, а также поперечные размеры температурных индикаций и их координат.

Обработку результатов ТНК проводят с помощью программного модуля ThermoScan, входящего в состав программного обеспечения ThermoFit Pro, а предварительное численное моделирование процедуры ТНК, требуемое для определения оптимальных параметров обнаружения дефектов в материалах с конкретными ТФХ и толщиной, проводят с помощью программного обеспечения ThermoCalc 3D Pro.

Условия и место проведения ТНК

Настоящая методика (способ контроля) ориентированы на проведение ТНК в условиях заводских лабораторий и производственных помещений при температуре окружающей среды от +15 до +45 °С с ее допустимой вариацией в течение процедуры ТНК одного изделия в диапазоне ± 2 °С, и относительной влажности воздуха не более 80 % при температуре +30 °С.

Алгоритм операций подготовки и выполнения ТНК

Для проведения ТНК способом тепловизионного сканирования объект контроля размещают на приводных роликах. Контролируемую поверхность цилиндра условно делят на кольцевые области, ширина которых соответствует длине области нагрева и полю зрения тепловизора с учетом перекрытия соседних кольцевых областей на заданную величину. Роботизированный манипулятор устанавливают напротив первой кольцевой области. Проводят визуальный осмотр средств контроля на предмет наличия их повреждений или загрязнений, а также объекта контроля на предмет загрязнения его поверхности, наличия выступающих частей конструкции, технологических отверстий или особенностей покрытия, оценивают равномерность температуры контролируемой поверхности в различных областях по образующей объекта контроля.

Технологический процесс ТНК

На рисунке В1 приведена схема крупногабаритного цилиндрического изделия, с соответствующими обозначением кольцевых областей, зон поперечного и продольного перекрытия, а также областей нагрева и регистрации температуры тепловизором (адаптировано из [136]).

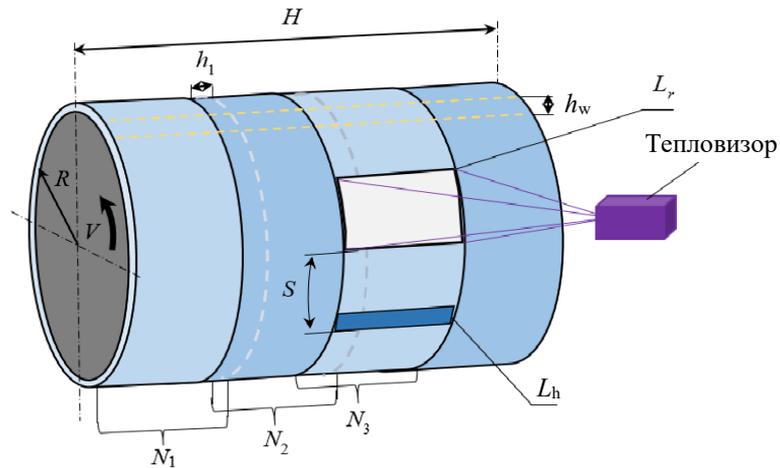


Рисунок В1 – Схема реализации ТНК крупногабаритного цилиндрического изделия способом тепловизионного сканирования

Технологический процесс ТНК крупногабаритного цилиндра, реализуемый с помощью роботизированного устройства с линейным источником нагрева, сводится к следующим шагам.

1. Объект контроля длиной H условно делят на кольцевые области $N_1, N_2, N_3 \dots N_i$, количество которых зависит от длины области нагрева L_h линейным источником тепловой стимуляции и соответствующего размера поля зрения тепловизора, с учетом ширины зоны продольного перекрытия h_1 .

2. В зависимости от радиуса R объекта контроля и ширины зоны поперечного перекрытия кольцевой области h_w , рассчитывают время контроля одной кольцевой области N .

3. Устанавливают скорость вращения V объекта контроля вдоль его продольной оси в соответствии с шириной полосы нагрева L_h , чтобы обеспечить требуемую длительность тепловой стимуляции контролируемой поверхности.

4. Путем численного моделирования определяют диапазон оптимальных времен появления дефектов в зависимости от толщины контролируемого покрытия.

5. В соответствии с установленной скоростью вращения V и временем появления потенциальных дефектов, задают расстояние S , определяющее время задержки между началом нагрева и регистрацией температуры.

6. Устанавливают частоту записи f термограмм в зависимости от скорости вращения V объекта контроля и пространственного разрешения тепловизора.

7. Запускают процесс контроля, при котором контролируемое изделие начинает вращаться, а тепловизор – регистрировать температуру нагретой линейным источником поверхности. После того как объект контроля сделает полный оборот с учетом зоны поперечного перекрытия h_w , процедура ТНК кольцевой области считается завершенной.

8. С помощью роботизированного манипулятора линейный источник нагрева и тепловизор перемещают вдоль оси объекта контроля для ТНК следующей кольцевой области.

9. Результаты ТНК каждой из кольцевых областей в виде последовательностей панорамных термограмм обрабатывают с использованием математических алгоритмов, например, МАГК, и преобразуют в карты дефектов, которые в последующем «сшивают» в полное панорамное изображение образующей объекта контроля.

10. Формируют отчет ТНК и заключение о качестве изделия.

Обработка, анализ и оценка результатов ТНК

Результатом ТНК способом тепловизионного сканирования является набор исходных последовательностей термограмм, соответствующих отдельным кольцевым областям, которые реконструируют в панорамные изображения, с целью дальнейшей обработки с использованием алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии, в том числе, на базе ИНС.

На рисунке В2 показана схема реконструкции исходной последовательности термограмм (Seq1) в последовательность панорамных изображений (Seq2). Количество термограмм последовательности (Seq1) определяет размер панорамных изображений последовательности (Seq2) и зависит от частоты записи f , а также длительности ТНК одной кольцевой области. Из строк (R_1) термограмм исходной последовательности (Seq1) путем построчной сборки составляют первое панорамное изображение (I_1), которое соответствует времени начала регистрации

температур тепловизором. Второе панорамное изображение последовательности (Seq2) составляют из вторых строк термограмм последовательности (Seq1) и так далее. В итоге, количество панорамных изображений последовательности (Seq2) определяется количеством строк кадра тепловизора и соответствует количеству строк термограмм исходной последовательности (Seq1). При этом, каждая строка термограммы последовательности (Seq1) соответствует определенному времени, прошедшему с момента начала нагрева поверхности объекта контроля. Таким образом, панорамные изображения последовательности (Seq2) характеризуют изменения температуры поверхности объекта контроля в установленном диапазоне времени.

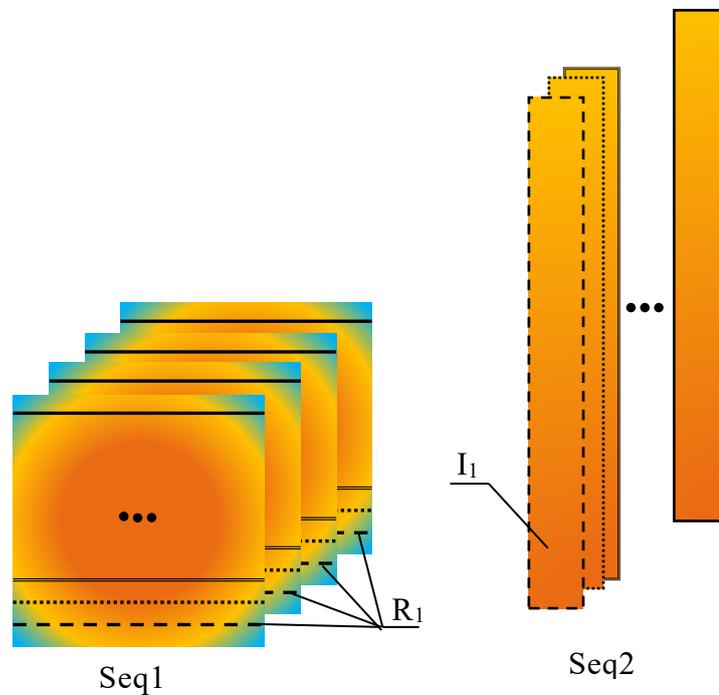


Рисунок В2 – Схема реконструкции исходной последовательности термограмм в последовательность панорамных изображений

Признаком дефектности объекта контроля является наличие характерных температурных индикаций, которые в панорамных изображениях представляют собой локальные области с повышенной или пониженной температурой, характер изменения температуры в которых отличается от характера изменения температуры в бездефектной области. Информативными параметрами температурных

индикаций являются их форма и размер, а также амплитуды температурных сигналов ΔT и моменты появления их максимумов, которые определяют глубины залегания внутренних дефектов. Уровень температурного сигнала ΔT определяет тип внутреннего дефекта: расслоение или инородное включение.

Ввиду большого объема температурных данных – результатов ТНК крупногабаритных объектов, подлежащих обработке и анализу, целесообразно применение автоматизированных алгоритмов, например, на базе ИНС.

Ниже описана процедура обработки результатов ТНК на примере одной кольцевой области крупногабаритного объекта с применением ИНС (процедура может быть реализована с помощью программного модуля ThermoScan). Следует отметить, что применение алгоритмов на базе ИНС подразумевает предварительное обучение сети на соответствующих экспериментальных данных или результатах моделирования. Алгоритм действий представляет собой следующие шаги: преобразование исходной последовательности термограмм (Seq1) кольцевой области в соответствующую последовательность панорамных изображений (Seq2); пространственная и временная фильтрация для сглаживания высокочастотных температурных шумов; глубокая обработка температурных данных с применением МАГК или МТОС (в зависимости от типа алгоритма обработки, используемого при обучении ИНС); нормализация температурных данных по амплитуде; загрузка температурных данных на вход обученной ИНС для получения карты глубин дефектов; осуществление процедуры дефектометрии, включающей определение количества обнаруженных дефектов, координат их расположения, поперечных размеров и площади; «сшивка» карт дефектов отдельных кольцевых областей в единую карту дефектов проконтролированного цилиндрического изделия; формирование протокола ТНК, содержащего информацию о параметрах дефектов, и заключения о годности объекта контроля.

МЕТОДИКА ТНК С КОМБИНИРОВАНИЕМ НАГРЕВА И ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПКМ С РАЗЛИЧНОЙ ПРОЗРАЧНОСТЬЮ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ И РАЗЛИЧНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Описанная ниже методика также не является регламентирующим документом, а представляет собой алгоритм действий, основанный на предложенном способе ТНК с применением линейного нагрева и принудительного охлаждения. Методика направлена на ТНК изделий из ПКМ с различной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения. Соблюдение приведенных в настоящей методике рекомендаций обеспечивает улучшение результатов испытаний по сравнению с классической односторонней процедурой контроля и ТНК способом тепловизионного сканирования.

Объект контроля

Объектами ТНК являются плоские, в том числе, крупногабаритные, изделия из угле- и стеклопластиков без покрытий, а также с покрытиями характерного для авиационной техники типа и цвета, в том числе с коэффициентом поглощения ниже 0,7.

Обнаруживаемые дефекты: внутренние расслоения и инородные включения, расположенные на глубине до 8 мм от контролируемой поверхности, ударные повреждения с энергией от 10 Дж, вода в ячейках сотовых панелей с толщиной обшивки до 4 мм, отслоения различных типов покрытий толщиной до 4 мм, нанесенных на ПКМ и металлы.

Цель контроля

Цель НК состоит в обнаружении вышеупомянутых дефектов в плоских обшивках и панелях авиационной техники (допускается контроль цилиндрических изделий с диаметром от 1 м), в частности, крыльев, рулей направления и высоты,

капотов турбовентиляторных двигателей, обшивок мотогондол и т.п., а также документировании результатов ТНК.

Общие требования к проведению ТНК

Настоящая методика относится к процедуре ТНК, включающей линейный нагрев с использованием конвективного, или контактного, или оптического источника и принудительного конвективного охлаждения, реализуемой с помощью портативного теплового дефектоскопа или роботизированной установки. Выбор типа источника нагрева производят, исходя из типа контролируемого материала, шероховатости и цвета его поверхности. Мощность нагрева ограничивают примерно 6 % от температуры деструкции контролируемого материала, а интенсивность принудительного охлаждения устанавливают таким образом, чтобы температура контролируемой поверхности в момент начала ее регистрации тепловизором была близка к начальной температуре контролируемого изделия (обычно – температуре окружающей среды).

Средства контроля и оцениваемые характеристики

Оцениваемые характеристики: амплитуды температурных сигналов ΔT ; время появления максимумов температурных сигналов τ_m ; характер профилей динамических температур; геометрические размеры температурных аномалий; локализация температурных аномалий; классификация температурных аномалий на классы «дефект» и «ложный дефект». Обработку результатов контроля проводят с помощью программного обеспечения ThermoFit Pro, моделирование процедуры ТНК для определения оптимальных параметров обнаружения дефектов проводят с помощью программного обеспечения ThermoCalc 3D Pro.

Структурная схема процедуры ТНК с применением линейного нагрева и принудительного охлаждения представлена на рисунке В.3.



Рисунок В.3 – Структурная схема процедуры ТНК с применением линейного нагрева и принудительного охлаждения

Условия и место проведения ТНК

Методика распространяется на контроль, проводимый в лабораторных и производственных условиях при температуре окружающей среды от +15 до +35 °С; относительной влажности воздуха не более 80 % и температуре +30 °С.

Алгоритм операций подготовки и выполнения ТНК

Перед началом ТНК необходимо провести визуальный осмотр средств контроля, а именно, удостовериться в целостности оптических элементов тепловизионного модуля, отсутствии механических повреждений

конвективного/контактного/оптического источника нагрева, устройства принудительного охлаждения конвективного типа, несущей конструкции теплового дефектоскопа.

Далее следует провести визуальный осмотр поверхности объекта контроля на предмет наличия конструкционных особенностей, например, креплений, усилений, технологических отверстий, а также наличия областей, имеющих покрытие различного типа или цвета. При необходимости очистить поверхность объекта контроля от грязи, пыли, масляных пятен и т.п. В случае, если контролируемый объект характеризуется частичной или полной прозрачностью в видимом диапазоне спектра излучения, устанавливают контактный или конвективный источник нагрева. Конвективный источник нагрева используют при необходимости создания импульса нагрева большей длительности, что актуально при ТНК материалов с низкой теплопроводностью. Оптический нагреватель устанавливают для ТНК изделий, поверхность которых характеризуется коэффициентом поглощения 0,95 и более.

Технологический процесс ТНК

Технологический процесс ТНК с применением принудительного охлаждения, реализуемый с помощью портативного теплового дефектоскопа сводится к следующим шагам.

1. С помощью программного модуля ThermoCalc_НС моделируют процедуру ТНК для определения оптимального диапазона времен появления скрытых дефектов, с учетом которых устанавливают длительность временной задержки - времени между началом тепловой стимуляции и началом регистрации температуры, которое зависит от скорости сканирования.

2. В зависимости от типа материала объекта контроля, наличия или отсутствия покрытия на его поверхности, а также его цвета, выбирают оптимальный источник нагрева.

3. Экспериментальным путем определяют требуемую мощность источника нагрева таким образом, чтобы температура поверхности объекта контроля в зоне нагрева была на уровне 60 % от температуры деструкции объекта контроля.

4. Запускают управляющее программное обеспечение ThermoFit Pro, с помощью которого устанавливают скорость сканирования путем регулировки скорости вращения ведущего колеса портативного дефектоскопа, устанавливают длительность процедуры ТНК и частоту регистрации термограмм тепловизионным модулем.

5. Запускают источник конвективного охлаждения для его выхода на рабочий режим.

6. Запускают источник нагрева для его выхода на рабочий режим. В случае использования контактного нагревателя устанавливают скорость вращения нагревательных роликов в соответствии со скоростью вращения ведущего колеса портативного дефектоскопа.

7. Устанавливают портативный тепловой дефектоскоп на поверхность калибровочного образца и с помощью программного обеспечения ThermoFit Pro запускают процедуру ТНК.

8. После проведения ТНК калибровочного образца запускают процедуру обработки данных с целью дефектоскопии и дефектометрии. Сравнивают полученные результаты с паспортом калибровочного образца.

9. После проверки работоспособности портативный дефектоскоп устанавливают на поверхность объекта контроля и запускают процедуру ТНК. После контроля одной линейной зоны перемещают портативный дефектоскоп для проведения следующей линейной зоны.

10. По окончании процедуры ТНК запускают процесс обработки результатов с целью проведения дефектоскопии и дефектометрии.

11. Полученные карты дефектов, содержащие информацию о дефектометрии в виде размеров температурных индикаций внутренних дефектов, их координат и глубин залегания, сохраняют в памяти компьютера.

12. Формируют отчет ТНК и заключение о качестве изделия.

Обработка, анализ и оценка результатов ТНК

Аналізу подлежат исходные последовательности термограмм, записанные тепловизионным модулем в процессе ТНК, а также панорамные изображения, полученные в ходе обработки с использованием алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии.

Признаком дефектности объекта контроля является наличие одной или нескольких температурных индикаций, которые на термограммах представляют собой локальные зоны повышенной температуры, причем информативными параметрами таких индикаций являются амплитуда температурных сигналов ΔT , их форма и размер, а также характер изменения температуры в зоне индикации во времени, отличный от динамики изменения температуры бездефектных зон образца.

Момент появления максимума температурных сигналов ΔT в зоне индикаций определяет глубину залегания внутреннего дефекта, а уровень температурного сигнала ΔT определяет тип внутреннего дефекта: расслоение или инородное включение. Поверхностные и подповерхностные дефекты ПКМ характеризуются величиной температурных сигналов ΔT от долей до нескольких градусов.

Если выявленная индикация характеризуется малой амплитудой температурного сигнала ΔT (на уровне 0,5 - 1,0 °С), то для улучшения ее визуального распознавания рекомендуется использовать алгоритмы математической обработки, например, Фурье-анализ. При этом полученные изображения не содержат информации о температуре, а дефектными отметками являются локальные зоны изменения текстуры (однородности) изображения, которые сопоставляют с зонами повышения температуры – температурными индикациями на термограммах исходной последовательности.

Фурье-анализ не требует каких-либо предварительных данных и может быть применен к любой последовательности термограмм, в которой температуры, в дефектных и бездефектных точках ведут себя во времени различным образом. Результатом применения Фурье анализа являются изображения амплитуд (амплиграммы) или фаз (фазограммы) на определенной частоте (как правило,

наилучшие результаты получают на первой значимой Фурье-частоте). Предпочтительно использование фазограмм, которые слабо зависят от флуктуаций температур, связанных с флуктуациями коэффициента излучения (поглощения) контролируемой поверхности.

Для автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии могут быть использованы алгоритмы на базе ИНС, применение которых подразумевает предварительное обучение сети, а последующее использование ИНС является эффективным лишь по отношению к последовательностям термограмм, которые по параметрам соответствуют тем термограммам, на которых проводилось обучение ИНС. Кроме того, перед обучением и использованием алгоритмов на базе ИНС, проводят предварительную обработку анализируемых последовательностей, включающую в себя, например, пространственную и временную фильтрацию, нормировку по уровню и т.п. Результатом работы автоматизированных алгоритмов на базе ИНС является карта дефектов, содержащая информацию о глубинах залегания дефектов, их толщинах, а также координатах расположения и типах дефектов.

Исходные последовательности термограмм и полученные карты дефектов сохраняют в память компьютера, на основании которых формируют отчет о ТНК с заключением дефектности объекта контроля.

МЕТОДИКА КОМБИНИРОВАННОГО ТНК КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Как и описанные выше, настоящая методика не является регламентирующим документом, а представляет собой описание последовательности действий по подготовке и проведению ТНК крупногабаритных изделий из ПКМ, имеющих различные конструктивные особенности, приводящие к возникновению внутренних дефектов производственного и эксплуатационного характера. Методика предусматривает применение оптического и УЗ источников тепловой стимуляции с последующим синтезом последовательности комбинированных изображений и их «сшивкой» в результирующую карту дефектов.

Объект контроля

Объектами ТНК являются изделия плоской, цилиндрической и сложной геометрической формы, в том числе, крупногабаритные, изготовленные из угле- и стеклопластиков, сотовых и сэндвич панелей, имеющие различные технологические отверстия, стрингеры, технологическую неравномерность толщины, интегрированные крепежные элементы из металлов и т.п.

Обнаруживаемые дефекты: внутренние расслоения, трещины, ударные повреждения, отслоения обшивки ячеистой структуры сотовых панелей и инородные включения, расположенные на глубине до 8 мм от контролируемой поверхности.

Цель контроля

Целью комбинированного ТНК является обнаружение характерных для ПКМ дефектов различного типа за одну процедуру ТНК, включая синтез карты дефектов с распределением дефектов по типам в автоматизированном режиме.

Общие требования к проведению комбинированного ТНК

Настоящая методика ТНК подразумевает использование двух типов тепловой стимуляции изделий, а именно, контактной УЗ стимуляции, эффективной для обнаружения дефектов в виде ударных повреждений и трещин, характеризующейся относительно небольшой областью одновременного контроля (для ПКМ до 150×150 мм), а также бесконтактного оптического нагрева, обеспечивающего выявление расслоений, инородных включений (в том числе воды в ячейках сотовых панелей) и контроль неравномерности толщины. Средства контроля, в частности, источники тепловой стимуляции и тепловизор, размещают на роботизированном манипуляторе с возможностью проведения ТНК серийных изделий из ПКМ сложной формы, например, нервюр самолетов с большим количеством технологических отверстий, в автоматизированном режиме с поочередным применением двух типов нагрева для конкретной области объекта контроля. Следует отметить, что положение точек ввода УЗ стимуляции для каждого типа объекта контроля определяют эмпирически (если речь идет о ТНК серийных изделий), а размер поля однократного контроля зависит от геометрической формы и материала изделия. Эффективность выявления дефектов существенно зависит от выбора расположения точек ввода УЗ стимуляции, а также от надежности контакта излучателя с объектом контроля.

Испытания крупногабаритного объекта контроля подразумевают его условное деление на отдельные области и применение для каждой из них двух видов нагрева с последующим синтезом полученных результатов, их пространственной «сшивкой» и автоматизированной обработкой с помощью алгоритмов на базе ИНС.

Средства контроля и оцениваемые характеристики

Средствами контроля являются тепловизионный модуль с широкоугольной оптикой, УЗ преобразователь магнитострикционного или пьезоэлектрического типа, оптический источник импульсного нагрева и роботизированный манипулятор для перемещения средства контроля относительно контролируемого объекта. Оценка дефектности объекта контроля основана на анализе температурных

значений в зоне контроля, с точки зрения характера их изменений во времени и пространственного распределения. Обработка результатов осуществляется с помощью программных модулей Thermo_NN и ThermoFusion, входящих в программное обеспечение ThermoFit Pro, и заключается в синтезе температурных данных, их пространственной «сшивке» и обработке результатов испытаний с целью определения количества дефектов, их типов и координат.

Условия и место проведения ТНК

Методика распространяется на проведение ТНК в лабораторных и производственных помещениях при температуре окружающей среды от +15 до +35 °С; относительной влажности воздуха не более 80 % при температуре +30 °С.

Алгоритм операций подготовки и выполнения комбинированного ТНК

Комбинированный ТНК подразумевает применение роботизированной установки с размещенными на ней средствами контроля и проведение испытаний в несколько этапов в ручном или автоматизированном режимах. Перед проведением ТНК необходимо проверить работоспособность средств контроля, условно разделить контролируемое изделие на области однократного контроля, а также определить порядок их контроля с учетом частичных перекрытий соседних областей, указав соответствующую последовательность перемещения в программном обеспечении для корректной пространственной сшивки синтезированной последовательности панорамных изображений. Провести визуальный осмотр поверхности объекта контроля на предмет наличия конструктивных особенностей, например, выступающих креплений, усилений, технологических отверстий, а также наличия областей, имеющих покрытие различного цвета. При необходимости механически очистить поверхность объекта контроля от загрязнения, пыли, масляных пятен и т.п.

Технологический процесс комбинированного ТНК

Технологический процесс комбинированного ТНК (рассмотрен пример ТНК крупногабаритного объекта сложной геометрической формы, показанного на рисунке В.4, с помощью роботизированной лабораторной установки, показанной на рисунке 6.7 Главы 6) с использованием оптического и УЗ видов источников тепловой стимуляции, обобщённо сводится к следующим шагам.

1. Объект контроля условно делят на равные по размерам области (три области обозначены пунктирными линиями на рисунке В.4).

2. С помощью роботизированного манипулятора размещают средства ТНК относительно объекта и определяют точку начала контроля.

3. На объект контроля наносят маркеры из материала с высоким коэффициентом отражения таким образом, чтобы при ТНК в поле зрения тепловизора попадали маркеры соседних зон.

4. Экспериментально или путем моделирования определяют оптимальные параметры проведения ТНК при оптическом нагреве, а также определяют оптимальное расположение точек УЗ стимуляции.

5. Проводят ТНК первой области используя УЗ стимуляцию. После выравнивания температуры поверхности объекта контроля проводят ТНК той же области с использованием оптической стимуляции. Средства контроля при испытаниях отдельной области не перемещают до выполнения ТНК с использованием УЗ и оптического нагрева. Записывают отдельные последовательности термограмм для каждой из процедур ТНК, длительность которых согласовывают, что необходимо для дальнейшего синтеза результатов контроля и их пространственной «сшивки».

6. После комбинированного ТНК первой области, с помощью роботизированного манипулятора перемещают средства контроля относительно поверхности объекта исследования таким образом, чтобы в поле зрения тепловизора попадала следующая область контроля. Испытания следующей областей проводят в той же последовательности, что и контроль первой области. Следует отметить, что по аналогии с ТНК крупногабаритных цилиндрических

изделий, целесообразно чередование областей контроля, а именно, проводить контроль, например, сначала четных областей, затем возвращаться для контроля нечетных областей.

7. Исходные последовательности термограмм, полученные при УЗ и оптическом видах нагрева, которые несут информацию о наличии скрытых дефектов в конкретной области объекта контроля, суммируют с помощью программного модуля ThermoFusion с целью синтеза результирующих последовательностей термограмм каждой из проконтролированных областей. После этого, синтезированные последовательности термограмм «сшивают» в последовательность панорамных изображений проконтролированной поверхности изделия с учетом частичного перекрытия соседних областей.

8. Аналогичным образом проводят комбинированный ТНК других областей объекта контроля, результатом которого является набор последовательностей панорамных изображений всех частей объекта контроля. После этого, последовательности панорамных изображений с целью дефектоскопии и дефектометрии обрабатывают с использованием программного модуля Thermo_NN.

Метки для
«сшивки»
панорамных
изображений

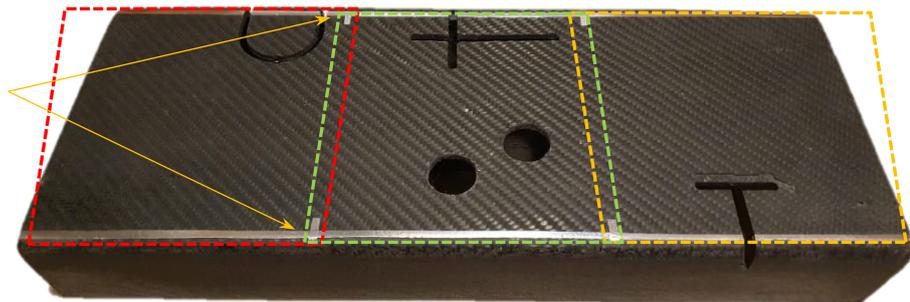


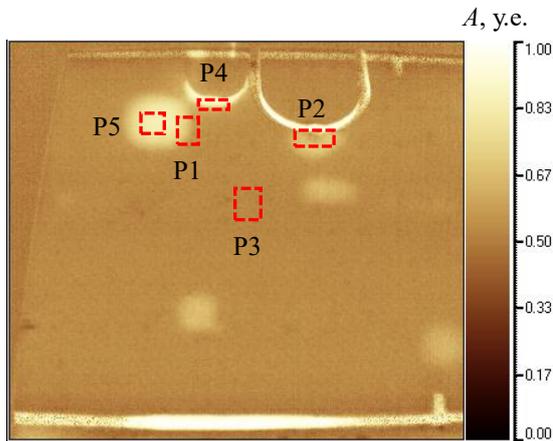
Рисунок В.4 – Образец из углепластика Ш-образного сечения и условным делением на отдельные области для проведения комбинированного ТНК

Обработка, анализ и оценка результатов ТНК

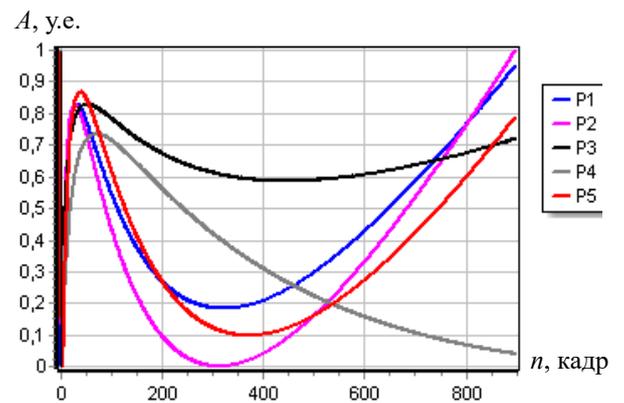
Аналізу подлежат результирующие последовательности панорамных изображений, с целью обнаружения внутренних дефектов, определения их типов (классификации) и координат с помощью автоматизированных алгоритмов, в том числе, на базе ИНС. Принцип классификации дефектов по типам основан на том факте, что дефект типа трещины, перпендикулярно ориентированной по отношению к контролируемой поверхности, обычно проявляется при УЗ стимуляции, а дефект типа расслоения, расположенный вдоль контролируемой поверхности – при оптической стимуляции. В связи с этим, характер температурных сигналов в зонах трещин и расслоений, в том числе, ввиду различного характера температурного воздействия, имеет характерные особенности. Следует отметить, что подобные уникальные характеристики температурных сигналов, «размываются», если анализируемый дефект проявляет температурные сигналы под воздействием обоих видов нагрева. На основе этого была разработана методика автоматизированной обработки результатов комбинированного ТНК для выявления дефектов, а также их классификации по типам с использованием ИНС.

Для примера, на синтезированном изображении отдельной области объекта контроля (рисунок В.5 а) красными пунктирными линиями обозначены зоны, соответствующие дефектам различных типов, а именно, внутреннему расслоению (зона Р1 соответствует краю, а зона Р5 - центру внутреннего расслоения), растрескиванию ПКМ на краю технологического отверстия (зона Р2), а также бездефектной области (зона Р3) и точке ввода УЗ стимуляции (зона Р4), температурный сигнал которой может быть принят в качестве ложного дефекта. На рисунке В.5 б, в показаны графики изменения производной от температуры по времени, соответствующие зонам Р1-Р5 при УЗ и оптической видах стимуляции. Соответствующие численные значения подаются на вход ИНС для ее обучения и применения с целью автоматизированного обнаружения дефектов и их классификации по типам (для примера целями обучения ИНС были заданы численные значения, соответствующие номерам зон Р1-Р5). На рисунке В.5 г показана карта дефектов одной из областей объекта контроля, на которой с

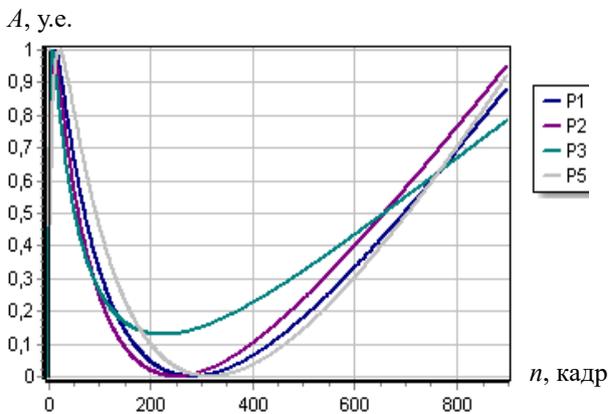
помощью ИНС дефекты были классифицированы по заданным типам. Численные значения, усредненные по соответствующим областям (см. рисунок В.5 з), а также цветовая шкала, демонстрируют удовлетворительную работоспособность автоматизированного алгоритма на базе ИНС с точки зрения классификации дефектных областей по их типам.



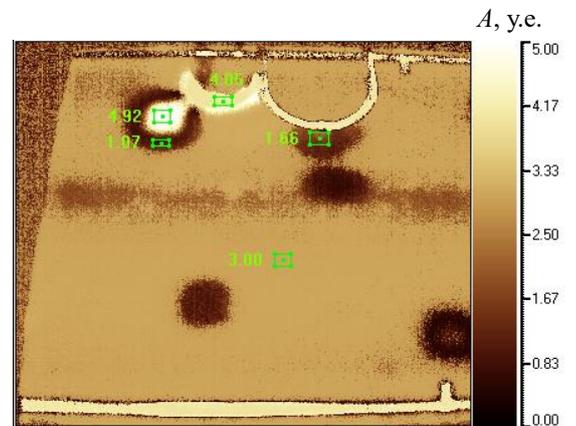
а) изображение синтезированной последовательности для 5-й секунды комбинированного ТНК



б) графики производных от температуры по времени при УЗ стимуляции



в) графики производных от температуры по времени при оптическом нагреве



з) карта дефектов, полученная с помощью алгоритма на базе ИНС с классифицированными областями по типам

Рисунок В.5 – Результаты комбинированного ТНК при оптическом и УЗ видах стимуляции, в том числе графики производных от температуры по времени и карта дефектов

Процедура предварительной обработки температурных данных с целью их подготовки для подачи на вход ИНС, рекомендации по выбору зон для сбора температурных данных, подаваемых на вход ИНС, а также процедура указания целей обучения ИНС для обнаружения дефектов и их классификации по типам, в обобщённом виде сводится к следующим шагам.

1. Экспериментальные результаты комбинированного ТНК суммируют для получения синтезированных последовательностей термограмм, затем «сшивают» в последовательности панорамных изображений, если речь идет о ТНК крупногабаритного объекта. Температурные данные полученной последовательности перед работой с ИНС обрабатывают, например, с помощью МАГК, и нормируют для распределения полученных значений в диапазон от 0 до 1.

2. Обучение ИНС проводят, используя экспериментальные данные, несмотря на то, что моделирование позволяет проанализировать множество вариантов различных дефектных ситуаций. Дело в том, что экспериментальные данные вследствие наличия температурных шумов имеют характерные особенности, которые трудно моделировать, а различие между экспериментальными данными и результатами моделированием существенно усиливается после их обработки, например, по МТОС.

3. Для обучения ИНС используют температурные данные дефектных ситуаций, которые предположительно могут иметь место в обрабатываемых последовательностях. Причем, чем больше конкретных примеров будет использовано для обучения ИНС, тем ниже будет погрешность дефектометрии. В то же время, использование большого количества данных для обучения ИНС может негативно сказаться на результате дефектометрии, если используемые данные не будут существенно различаться. Сбор данных для обучения ИНС в рамках одной дефектной области проводят в нескольких зонах небольших размеров с целью учета диффузии тепла. Такой же подход используют для сбора температурных данных бездефектных областей, чтобы учесть флуктуации связанные, например, с неравномерным нагревом объекта контроля (иллюстрации выбора областей для сбора данных с целью обучения ИНС приведены в Главе 4).

4. В зависимости от задачи, целями обучения ИНС устанавливают либо глубины залегания скрытых дефектов (для дефектометрии), либо присваивают различные численные характеристики дефектных областей, выявляемых, например, только при УЗ стимуляции или при оптическом нагреве (для классификации дефектов). Кроме того, при проведении дефектометрии по синтезированным последовательностям комбинированного ТНК, в качестве целей обучения на температурных профилях бездефектных областей и зонах повышения температур непосредственно в точках ввода УЗ стимуляции, устанавливают одинаковое численное значение, например, равное толщине исследуемого объекта. Данный подход позволяет исключить из карты дефектов зоны ввода УЗ стимуляции, которые могут быть идентифицированы как аномалии в дефектных зонах.

5. Обученную ИНС применяют к результатам экспериментальных исследований, полученных при одних и тех же параметрах ТНК, таких как длительность и частота записи термограмм, длительность и мощность нагрева. Следует отметить, что результаты ТНК, которые подают на вход ИНС для дефектоскопии и дефектометрии, обрабатывают с использованием тех же алгоритмов, что были использованы для обработки данных, по которым была обучена ИНС.

6. Результирующую карту дефектов обрабатывают с целью сглаживания пространственных шумов, после чего для полученного изображения подбирают цветовую палитру, либо присваивают определенные цвета выявленным дефектным зонам, соответствующим определенным типам дефектов.

7. По результатам ТНК с помощью программного модуля Thermo_NN формируют протокол испытаний, который содержит информацию о количестве выявленных дефектов, координатах центров дефектов относительно точки начала контроля, а при необходимости, содержит информацию о глубине залегания выявленных дефектов и их поперечных размерах.