

ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ: РАЗВИТИЕ ТРАДИЦИОННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ И НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ (ОБЗОР)

© 2023 г. В.П. Вавилов^{1,*}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 623050 Томск,
пр-т Ленина, 30
E-mail: *vavilov@tpu.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023; после доработки 05.05.2023

Принята к публикации 05.05.2023

В последние годы тепловой контроль является быстро развивающейся областью неразрушающих испытаний, что обусловлено разработкой композиционных материалов, испытания которых традиционными методами затруднительны. Несомненный прогресс произошел в разработке и коммерциализации тепловизоров, которые составляют основу тепловых дефектоскопов. Отталкиваясь от более ранних обзоров, автор попытался суммировать достижения последних лет как в методологии испытаний и обработки температурной информации, так и в области разработки современных тепловых дефектоскопов и сфер их применения. Обзор включает отечественные достижения в области теплового контроля и многочисленные зарубежные исследования, благодаря которым тепловой контроль рассматривается как один из основных методов неразрушающих испытаний отдельных классов материалов и конструкций.

Ключевые слова: тепловой контроль, инфракрасный тепловизор, теория теплопроводности, дефект, тепловой дефектоскоп, анализ инфракрасных изображений, композиционные материалы, обработка данных.

DOI: 10.31857/S0130308223060040, EDN: AАНВМІ

1. ВВЕДЕНИЕ

Написанию настоящего обзора способствовал неоспоримый факт взрывного интереса к активному тепловому контролю (ТК), наблюдаемого с начала нынешнего столетия. Быстрое развитие данного вида неразрушающих испытаний требует периодического осмысления сложившегося состояния и тенденций развития методов исследования структуры твердых тел с использованием инфракрасной (тепловизионной) техники.

Для нового поколения исследователей представляет интерес вспомнить основные вехи развития ТК. Как известно, спрос на разработку методов и аппаратуры неразрушающего контроля (НК) материалов и изделий появился с утверждением массового промышленного производства, требовавшего внедрения системы проверки качества продукции. В основе каждого вида (метода) НК лежат определенные физические принципы, включающие использование полей и частиц различной природы. Тепловой контроль использует феномены, сопровождающие распространение в твердых телах нестационарных тепловых потоков, возбуждаемых различными способами/средствами. При этом, согласно ГОСТ 27.002—2015 «Надежность в технике. Термины и определения», дефектом называется каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией. При тепловой стимуляции различной природы условно «бездефектное» тело характеризуется регулярной текстурой теплового потока, выражающейся в эталонной структуре возникающего в объекте контроля нестационарного температурного поля. Структурные дефекты вызывают локальные возмущения этого поля, регистрируемые температурными датчиками, из которых практически интересны тепловизоры. Таким образом, история ТК связана с развитием теории теплопроводности и оптики инфракрасного (ИК) диапазона.

Как известно, техническую диагностику и НК можно рассматривать как аналог медицинской диагностики применительно к объектам неживой природы. Это утверждение более чем справедливо в отношении ТК. Показатели здоровья живого организма связаны с метаболическими процессами, которые протекают в весьма узком температурном интервале, выход за пределы которого отражает появление определенных дисфункций, то есть «поломок» организма. Фактически, температуру как показатель здоровья человека применяли в медицине с древних времен с использованием контактных средств. Принято считать, что тепловое (ИК) излучение было открыто W. Hershel в 1800 г. В области математической теории теплопередачи фундаментальные работы были опубликованы J. Fourier [1] и М.А.Ж. Ångström [2]. Ранние идеи по анализу изменения температуры в частотной и/или временной областях с использованием преобразований Фурье и Лапласа впоследствии были широко использованы в ТК для целей шумоподавления и дефектотрии. Описание истории развития тепловидения как метода и аппаратных средств визуализации и измерения

температуры выходит за рамки настоящего обзора (см. монографии [3—5]), поэтому ограничимся замечанием, что современное тепловидение берет начало в военных разработках 1950-х годов на Западе и в бывшем СССР, причем сам термин «теповидение» восходит к торговой марке «Thermovision» шведской фирмы AGA, приборы которой стали пределом мечтаний отечественных пользователей в 1970—1980-е годы. В последние годы опубликован ряд учебных книг и монографий, отражающих современное состояние различных аспектов ИК термографии и ТК [6—23].

Возвращаясь к собственно НК, можно констатировать, что исторически в конце XX-го века сложились три фундаментальные системы НК, а именно: американская, немецкая и советская (российская). В бывшем СССР была создана отечественная школа активного ТК работами П.К. Ощепкова, Н.А. Бекешко, А.Б. Упадышева, Ю.А. Попова, А.Е. Карпельсона, В.П. Вавилова, Д.А. Рапопорта, Е.В. Абрамовой, А.И. Потапова, Ю.В. Гавинского и других. В конце прошлого века сформировались группы ТК в НИИ интроскопии (г. Москва), Томском политехническом университете (г. Томск), ЦНИИ специального машиностроения (г. Хотьково), в то время как множество смежных исследований проводили исследователи в аэрокосмической, машиностроительной, электронной, строительной отраслях. Анализ этих работ привел бы к существенному расширению настоящего обзора.

На рубеже двух веков произошли фундаментальные изменения в материальной базе ТК. Если во времена бывшего СССР автор этих строк знал чуть ли не все экземпляры зарубежных тепловизоров в стране (!), а номенклатура массовых отечественных тепловизоров ограничивалась приборами «Радуга», ТВ-03, затем — «ИРТИС», то произошедшая революция в области аппаратной базы тепловидения привела к улучшению технических параметров, взрывоподобному росту номенклатуры и снижению стоимости тепловизоров. Не рассматривая причины сохраняющегося отставания отечественных разработок в области тепловидения от лучшего мирового уровня, что связано с технологическим отставанием в области матричных (особенно неохлаждаемых) ИК-детекторов, тем не менее можно констатировать, что тепловизоры перестали быть предметом роскоши, а стали средством измерения температуры. Более того, с началом специальной военной операции в Украине, термин «теповизор» стал применяться широкой публикой, хотя одновременно, вследствие санкций, возникли проблемы с поставкой в Россию тепловизоров элитного уровня. Можно предположить, что в сложившейся политической и технологической ситуации работы по развитию отечественной базы ИК-техники будут интенсифицированы, как показала последняя Международная научно-техническая конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, г. Москва, 25—27 мая 2022 г.

Второе фундаментальное изменение в отношении к ТК связано с повсеместным внедрением композиционных материалов в передовые технические отрасли, прежде всего авиацию, ракетно-космическую и военную технику, транспорт и т.д. По «счастливому» совпадению ТК оказался весьма пригодным для НК дефектов в таких материалах, что, в сочетании с высокой производительностью ТК, позволило включить этот метод в список наиболее востребованных видов НК наряду с визуально-измерительным, ультразвуковым, радиационным, проникающих веществ. По ряду направлений, прежде всего в авиационной и ракетно-космической промышленности, ТК рассматривают в качестве важнейшего (например, данный метод был основным при расследовании причин катастрофы космического челнока Columbia в 2003 г. [21]).

Вышеописанные факторы привели к созданию рынка устройств для активного ТК (тепловых дефектоскопов), показанных на рис. 1. Термин «теповой дефектоскоп» (ТД) появился во времена бывшего СССР и обозначал законченные устройства для обнаружения скрытых дефектов с использованием принципов активного теплового контроля (ТК). Примерами таких устройств были околоповерхностные термоэлектрические дефектоскопы Ю.В. Гавинского и др., применявшиеся для контроля ракетной теплозащиты [16], линейно-сканирующие ИК устройства, созданные Д.А. Рапопортом, С.С. Денисовым, В.А. Стороженко и др. [16], система контроля горячего металлопроката, разработанная О.Н. Будадиным, Е.В. Абрамовой и др. [18], фоторегистрирующий ИК-дефектоскоп паяных изделий ФИД-1 Томского политехнического университета [16] и др. Будучи передовыми для своего времени, указанные устройства использовали аналоговую обработку температурной информации и применялись, в основном, для целей дефектоскопии, а разработанные в то время алгоритмы дефектометрии требовали громоздких вычислений на больших ЭВМ [16].

Новое поколение ТД появилось в последнее десятилетие, будучи связанным с разработкой экономичных тепловизионных модулей высокого качества (на базе неохлаждаемых микроболометрических матриц), а также ростом эффективности компьютерной техники. На мировом рынке появились ТД стандартного состава, включающие малогабаритный тепловизор, оптический источник нагрева и

а



б



в



г



д



е



ж



з





Рис. 1. Тепловые дефектоскопы:

а — VoyageIR (Thermal Wave Imaging, США, www.thermalwave.com/products); *б* — ThermoSpector (DCG Systems, Германия, www.xpertgate.de/produktfamilie/Infrarot_Pruefzelle); *в* — C-CheckIR (Automation Technology, Германия, <https://www.automationtechnology.de/cms/en/mobile-ndt-systems-for-maintenance>); *г* — OTvis (EDEVIS, Германия, www.edevis.com/content/en/optical_lockin_thermography); *д* — WELD-CHECK (InfraTec, Германия, www.infratec.eu/thermography/non-destructive-testing); *е* — лабораторная установка (MoviTHERM, U.S.A., www.movitherm.com); *ж* — NDTherm (OpGal, Израиль, www.opgal.com/thermography-ndt-testing); *з* — роботизированная установка ИК-термографического контроля фюзеляжей самолетов (NASA, США, <https://www.nextech.sk/a/NASA>); *и* — тепловой дефектоскоп с ультразвуковой стимуляцией для испытаний лопаток турбин (ТПУ, Россия, web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk); *к* — самоходный тепловой дефектоскоп для контроля крупногабаритных плоских объектов (ТПУ, Россия, web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk); *л* — роботизированный тепловой дефектоскоп для контроля крупногабаритных цилиндрических объектов (ТПУ, Россия, web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk); *м* — портативный тепловой дефектоскоп (ТПУ, Россия, web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk); *н* — установка DEFECTOVISION для индукционного ИК термографического контроля изделий сложной формы (Förster, Германия, www.foerstergroup.ru/ru/rus/produkcija/defectovision-ct/termografija/); *о* — компактный модуль для онлайн контроля композитов (Automation Technology, Германия, <https://www.automationtechnology.de/cms/en/compact-ndt-systeme-fuer-produktionsanlagen>).

компьютер. Первыми коммерческими приборами теплового контроля (ТК), получившими широкую известность, явилась аппаратура фирмы Thermal Wave Imaging (США), в которой, помимо современного «железа» (hardware), был использован запатентованный принцип так называемой термографической обработки сигналов (TSR-Thermographic Signal Reconstruction) [24]. Фактически, данный метод включает полиномиальную аппроксимацию экспериментальных температурных откликов объектов, подверженных импульсному нагреву, с последующим анализом первой и второй производных от температуры по времени. В последние годы на мировом рынке активны фирмы из Германии Automation Technology, InfraTec, DCG Systems (бывшая Thermosensorik) и израильская фирма Orgal. В России интенсивные исследования в этом направлении проводятся в Томском политехническом университете (ТПУ), в частности, для конкретного промышленного заказчика создан роботизированный комплекс активного теплового контроля теплозащиты крупногабаритных цилиндрических изделий, в котором достигнута весьма высокая производительность непрерывного контроля (до 25 м² в час при полном объеме температурной информации около 80 Гб на изделие) [25].

2. СОСТОЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ АКТИВНОГО ТК

Обзоры зарубежных и отечественных исследований в области активного ИК термографического контроля содержатся в ряде монографий и обзорных статей [12, 15, 16, 18, 19]. Группы исследователей и организации, которые активны в последнее десятилетие, приведены в табл. 1. В области аппаратурной базы ТК радикальные изменения связаны с появлением широкой номенклатуры коммерческих тепловизоров и тепловизионных модулей, на основе которых разработаны мелкосерийные и единичные ТД (см. рис. 1). Практическая востребованность ТК будет возрастать по мере растущей автоматизации и роботизации экспериментальных установок, что обеспечивает повторяемость результатов, высокую производительность метода, возможность непрерывного контроля крупногабаритных изделий сложной формы и т.д. В методическом плане продолжают эксплуатироваться как хорошо известные подходы, так и новые способы и средства тепловой стимуляции объектов контроля, а также внедряются принципы комбинирования и синтеза нескольких методов НК. Тепловой контроль остается удачной областью для внедрения новых математических алгоритмов обработки температурной информации, направленных на повышение отношения сигнал/шум и разработку методик тепловой дефектометрии и томографии.

Таблица 1

Современные группы исследователей в области активного ТК*

Исследователи (организация, страна)	Направления исследований	Источник**
X. Maldague (University Laval, Канада)	Общие вопросы и популяризация ТК, новые методы обработки данных	[10, 12]
Xioyan Han (Wayne State University, США)	Акустическая ИК-термография	[26, 27]
S.D. Holland, Iowa State University, США	Общие вопросы и популяризация ТК	[28, 29]
J.N. Zalameda, W. Winfree, E. Cramer (NASA Langley Research Center, США)	Аэрокосмические применения ТК, развитые методы обработки данных	[30, 31]
S. Shepard (Thermal Wave Imaging, Inc., США)	Аппаратура и метод термографической реконструкции сигнала	[24]
J. G. Sun (Argonne National Laboratory, США)	Тепловая томография, основанная на измерении тепловой инерции	[32]
J.-M. Roche, D.L. Balageas (ONERA, Франция)	Теплофизические основы ТК, тепловая дефектометрия	[33]
N. Rajic (Defence Science and Technology Group, Australia)	Метод анализа главных компонент в ТК	[34]
S.D. Pickering (University of Bath, Великобритания)	Общие вопросы ТК, термоакустика	[35]
C. Maierhofer (BAM, Германия)	Общие вопросы ТК	[36]
B. Oswald-Tranta (University of Leoben, Австрия)	Индукционная ИК-термография	[37]
G. Mayr (University of Applied Sciences, Австрия)	Теплофизические свойства композитов	[38]
U. Netzelmann	Индукционная ИК-термография	[39]

Продолжение табл. 1

J.-P. Batsale, C. Pradere	Теплофизические аспекты ТК; комбинирование с терагерцовым контролем	[40]
N.P. Avdelidis (University of Cranfield, Великобритания)	Общие вопросы ТК, композиционные материалы	[41]
A. Nowakowski, M. Kaczmarek (Gdansk University of Technology, Польша)	Биомедицинские аспекты тепловидения, включая активную ИК-термографию	[42]
W. Minkina (Czestochowa University of Technology, Польша)	Общие вопросы и метрология ТК	[43]
W. Świdorski (Military Institute of Armament Technology, Польша)	Композиционные материалы военного и авиакосмического назначения	[44]
B. Więcek (University of Lodz, Польша)	Общие вопросы ТК	[45]
G. Steenackers (University of Antwerpen, Бельгия)	ИК термографический контроль объектов искусства	[46]
M. Omar (Khalifa University, OAE)	Общие вопросы ТК, нейронные сети	[47]
R. Usamentiaga (University of Oviedo, Испания)	Развитая обработка данных в ТК	[48]
P. Bison (ITC-CNR, Италия)	Общие вопросы ТК, определение ТФХ, ТК объектов искусства	[49]
C. Meola, G.-M. Carlomagno (Università di Napoli Federico II, Италия)	Термоволновой ТК (синхронная ИК-термография)	[50]
U. Galletti (University of Bari, Италия)	Развитая обработка данных в ТК	[51]
M. Švantner (University of West Bohemia, Чехия)	ТК композитов и тепловая дефектометрия	[52]
R. Mulaveesala (Institute of Technology Delhi, Индия)	Тепловые волны, в особенности, частотно-модулированные, и их применение в различных отраслях	[53]
H.-S. Park, M.-Y. Choe (Korea Institute of Machinery and Materials, Korea)	Термоакустика, нормативно-методическое обеспечение ТК	[54]
T. Sakagami (Osaka University, Япония)	ИК-термография для анализа термоупругих напряжений (метод TSA)	[55]
Guo Xingwang (Beihang University, Китай)	Общие вопросы ТК, авиакосмические применения	[56]
Hai Zhang (Harbin Institute of Technology, Китай)	Теория ТК, тепловая дефектометрия и томография	[57]
J.R. Tarpani, (University of Sao Paulo, Бразилия)	ИК-термография и механические испытания	[58]
F.W. Panella (University of Salento, Италия)	ТК композитов	[59]
В.П. Вавилов, А.О. Чулков, Д.А. Дерусова (Томский политехнический университет, Россия)	Общие вопросы ТК, моделирование и обработка данных, роботизированная аппаратура ТК, лазерная виброметрия	[16, 25]
О.Н. Будадин, С.О. Козельская (ЦНИИ специального машиностроения, Россия)	Тепловая дефектометрия, композиционные материалы, комбинирование методов НК, контроль крупногабаритных изделий	[60]
Е.В. Абрамова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия)	Нормативно-методические аспекты и обучение в области ТК	[61]
Потапов А.И. (Северо-Западный государственный заочный технический университет, Россия)	НК композиционных материалов, комбинированные методы НК	[18]
В.Н. Чернышев (Тамбовский технический государственный университет, Россия)	Теплофизические аспекты ТК	[62]
В.А. Захаренко (Омский государственный технический университет, Россия)	Пирометрия и метрология	[63]
И.О. Котовщиков («Локус», Россия)	Активный ТК авиационных композитов	[64]

Примечание. *Данные приведены в произвольном порядке и отражают субъективное мнение автора. Приведена ссылка на фактического руководителя работ (principal investigator) или лидера по числу публикаций. Ряд групп прекратили активную деятельность на момент данной публикации, данные приведены для полноты картины. Не включены исследователи, специализирующиеся на пассивном ИК-термографическом контроле.

**По возможности приведены публикации последних лет.

3. ТЕОРИЯ ТК

Любую процедуру ИК-термографического контроля можно рассматривать как совокупность методов и средств анализа оптических и тепловых (температурных) феноменов, поэтому, как отмечено выше, теоретическую основу ТК составляет теория теплопередачи, в особенности, теория теплопроводности твердых тел, а также элементы оптоэлектроники, включая теорию теплового излучения.

Принципы моделирования прямых теплофизических задач ТК хорошо разработаны на основе как специализированных (ThermoCalc-3D, Томский политехнический университет), так и универсальных компьютерных программ (ANSYS, Comsol Multiphysics). Соответствующие решения позволяют получать зависимости между размерами и глубиной скрытых дефектов, теплофизическими характеристиками (ТФХ) материалов и параметрами тепловой стимуляции. Фактически рассчитывают величину температурного сигнала над дефектом ΔT , сравнивая которую с температурным разрешением тепловизора ΔT_{res} , оценивают предельные возможности ТК. На практике такие расчеты следует выполнять с введением шумов, сопровождающих экспериментальные процедуры ТК, что позволяет определить реальные возможности метода. Реалистичные решения, как правило, являются численными, поскольку они должны учитывать диффузию тепла по всем координатам. Одномерные решения теплопроводности многослойных структур весьма громоздки и также требуют использовать численные методы решения сопутствующих трансцендентных уравнений. Для приближенного представления о закономерностях нагрева твердых тел с дефектами используют классические решения теории теплопроводности, которые в настоящем обзоре не рассматриваются (см. их детальный анализ в [16, 18—20]).

В академическом плане более интересны решения обратных задач ТК, которые позволяют путем анализа так называемого куба данных (data cube), т.е. экспериментальной последовательности ИК термограмм $T(x, y, \tau)$, оценить параметры скрытых дефектов $\{h, l, d\}$ (здесь h — поперечные размеры дефекта; l — глубина залегания дефекта; d — толщина дефекта). Математически куб данных представлен функцией $T(i, j, k)$, где (i, j) являются координатами, а k — номер термограммы, связанный с реальным временем. Результаты ранее выполненных исследований сводятся к следующему. Форму и поперечные размеры дефектов h достаточно надежно оценивают визуальным способом непосредственно по термограммам, даже несмотря на диффузию тепла, на которую часто ссылаются для оправдания феномена «расплывания» температурных отпечатков в зонах дефектов. Глубина дефектов является решающим фактором обнаружения в одностороннем ТК, тогда как в двухсторонней процедуре величина l является сравнительно слабым фактором эффективности ТК. Что касается толщины дефектов, то в диапазоне воздушных дефектов с $d < 300$ мкм можно принять, что $\Delta T \sim d$ как в одно-, так и двухсторонней процедурах.

4. ПРОЦЕДУРЫ ТК

4.1. Классические процедуры ТК (оптический нагрев)

Условно можно считать, что классическими являются одно- и двухсторонняя процедуры ТК с использованием оптических источников нагрева (рис. 2), из которых наиболее распространены галогенные лампы мощностью 0,5—2 кВт. В некоторых ТД также применяют импульсные ксеноновые лампы с длительностью «вспышки» 5—10 мс и мощностью до 3,2 кДж каждая, однако громоздкость и высокая стоимость таких источников нагрева делают их малоприменимыми для использования в портативных тепловых дефектоскопах (исключение — аппаратуры фирмы Thermal Wave Imaging).

Односторонний ТК представляет практический интерес при испытаниях в условиях цеха, ангара и на открытом воздухе, в то время как в лабораторных условиях можно реализовать и двухстороннюю процедуру. В двухстороннем ТК весьма эффективно построение карт теплопроводности, которые более устойчивы к шумам по сравнению с обычными ИК термограммами. В любом случае результатом контроля является последовательность ИК термограмм, отражающая динамику поверхностного температурного поля объекта контроля (количество термограмм в последовательности может достигать нескольких тысяч, хотя в практических ТД оно обычно не превышает нескольких десятков).

Проблемой оптической стимуляции является слабый нагрев объектов контроля с низким коэффициентом поглощения в видимой области спектра, например, окрашенных в светлые тона панелей самолетов, а также наличие отраженного излучения в тепловом (ИК) диапазоне. Последний

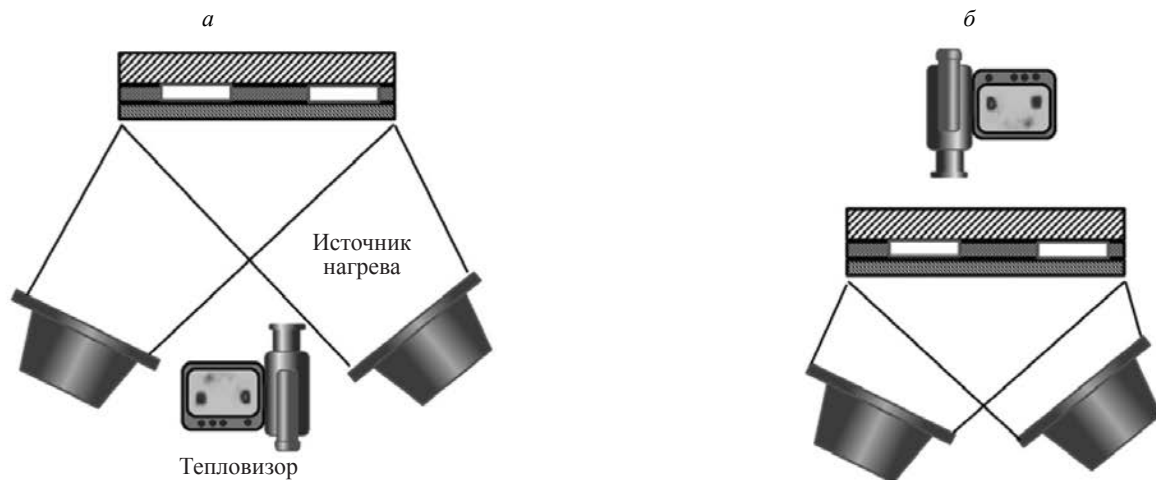


Рис. 2. Классические процедуры одно- (а) и двухстороннего (б) ТК.

вид помехи связан с нагревом колб и корпусов оптических источников нагрева, что приводит к искажению ИК термограмм уже после выключения источников. Основными способами борьбы с этим видом помех являются: 1) электрическое управление формой импульса нагрева; 2) введение механических шторок; 3) отворот нагревателей после выключения излучения нагрева; 4) использование оптических фильтров, в том числе обычного стекла, непрозрачного в диапазоне длин волн более 2,5 мкм, а также линз Френеля; 5) использование лазеров, работающих на длинах волн, находящихся вне диапазона спектральной чувствительности тепловизора.

Лазеры достаточно часто используют в научных исследованиях, требующих кратковременный мощный нагрев. Однако их широкому применению в ТК препятствуют высокая стоимость, низкий к.п.д. и громоздкость. В то же время рассеяние лазерного пучка в широкой зоне значительно снижает среднюю мощность нагрева, поэтому лазеры используют главным образом для точечного или сканирующего нагрева в ряде специальных задач, например, при контроле точечных сварных швов в автомобилестроении [65], паяных соединений печатных плат [66] и т.п.

Устройства ТК, использующие классический оптический нагрев, применяются в следующих областях: 1) заклепочные соединения авиационных алюминиевых панелей (коррозия, качество соединения); 2) композитные панели планеров самолетов, сотовые и монолитные (вода, пористость, расслоения, непрочности, включения); 3) лопасти вертолетных пропеллеров и ветрогенераторов (расслоения, непрочности); 4) лопатки турбин (отслоения); 5) композиционные элементы строительных конструкций; 6) объекты культурного наследия (здания, живопись, скульптура, археологические объекты).

4.2. Линейное сканирование (оптический нагрев)

С одной стороны, процедуры ТК, связанные с непрерывным точечным или линейным (рис. 3) сканированием объекта исследований, могут считаться классическими, в особенности с учетом ранних работ Д.А. Рапопорта, В.А. Стороженко, О.Н. Будаина в 1980-е годы по ТК крупногабаритных цилиндрических изделий из стеклопластика [67]. Для нагрева применяли полосовые источники значительной длины, а температурное поле изделий в виде развертки цилиндра регистрировали с помощью линейно-сканирующих ИК-радиометров. Каждое полное изображение соответствовало определенной временной задержке момента регистрации температуры относительно окончания нагрева, и для выявления дефектов по всей толщине цилиндрических оболочек было необходимо повторять сканирование при изменяющихся временах задержках. В последующие годы эйфория от победного шествия матричных тепловизоров снизила интерес к ИК-сканерам, однако в настоящее время этот метод ТК испытывает возрождение вследствие замены ИК-радиометров тепловизорами и хорошего сочетания аппаратуры ТК с роботизированными комплексами [68] (см. рис. 3в). Основной областью применения таких комплексов является НК изделий ракетно-космической техники цилиндрической и конической формы.

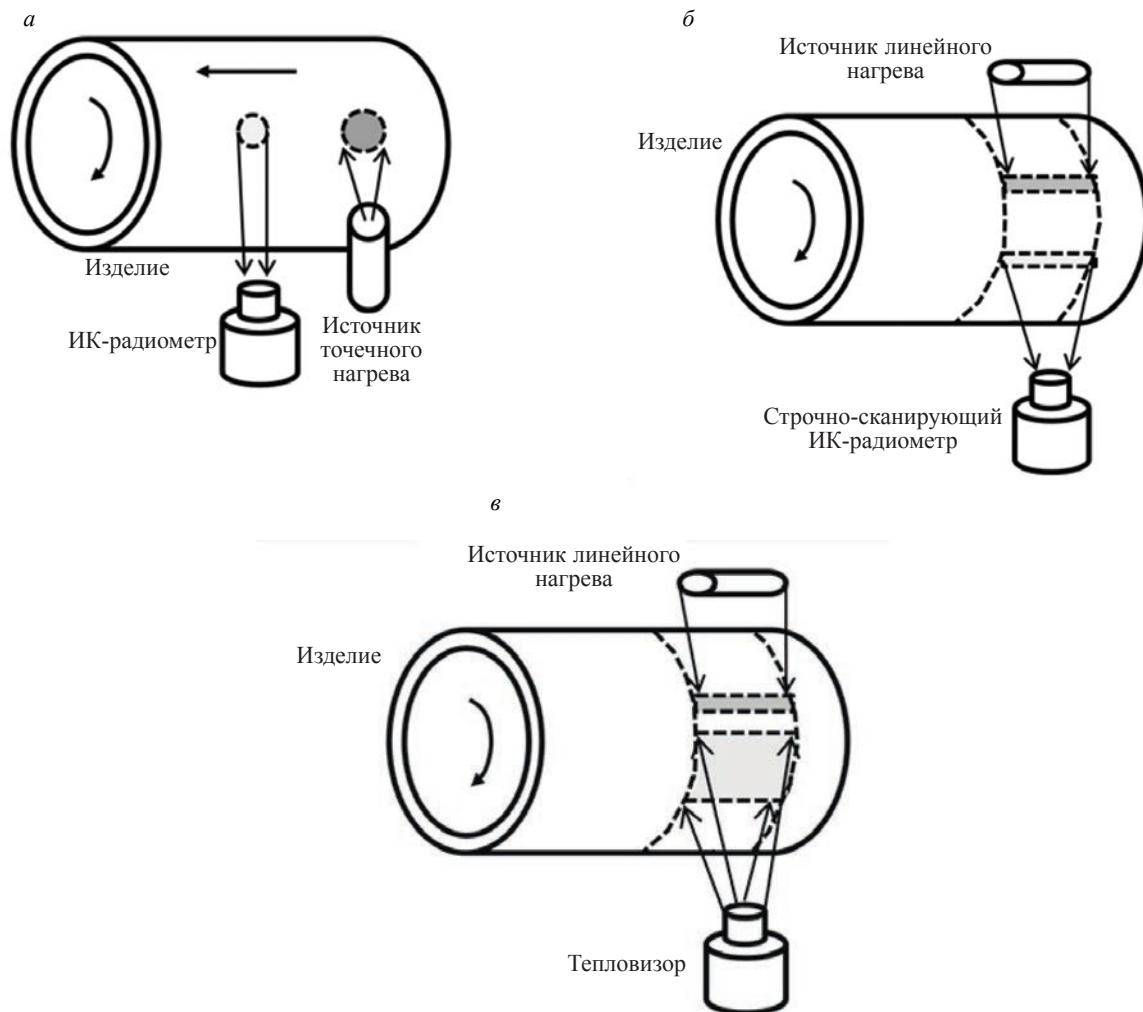


Рис. 3. Процедуры линейного сканирования с использованием точечных (а), строчно-сканирующих (б) ИК-радиометров и тепловизоров (в).

4.3. Акустическая ИК термография

В публикациях, где описаны техники термографирования при механической стимуляции объектов контроля, используют несколько терминов: «термоакустика» и «вибротепловизионный метод» (в России), «вибротермография» (vibrothermography), «звуковая ИК-термография» (sonic IR thermography), «ультразвуковая ИК-термография» (ultrasonic IR thermography). Эффективность этих способов ТК зависит от частоты ультразвуковой стимуляции и цели НК, будь то обнаружение скрытых дефектов или оценка механических напряжений.

Феномены вязкоупругости в бездефектных материалах, подвергнутых механической нагрузке, характеризуются слабыми температурными сигналами, тем не менее, тепловизионный анализ тонких температурных феноменов в изделиях сложной формы позволяет визуализировать механические напряжения в рамках так называемого метода анализа термоупругих напряжений (Thermoelastic Stress Analysis-TSA), использующего уравнение Томсона. Например, в мягких сталях изменение напряжений на уровне 1 МПа вызывает изменение температуры на уровне 1 °С. Поскольку требования к температурной чувствительности такого метода весьма высоки, используют циклическое (гармоническое) нагружение и принцип синхронного детектирования. Напомним, что W. Thomson (Lord Kelvin) был одним из первых ученых, описавших эффект термоупругости [69].

Интерес к использованию термоакустических феноменов в НК возрос в последнее время благодаря парадоксальной особенности метода, а именно, улучшению возможности дефектоскопии малых и «слипнутых» дефектов (трещин), в которых тепловая энергия генерируется за счет трения

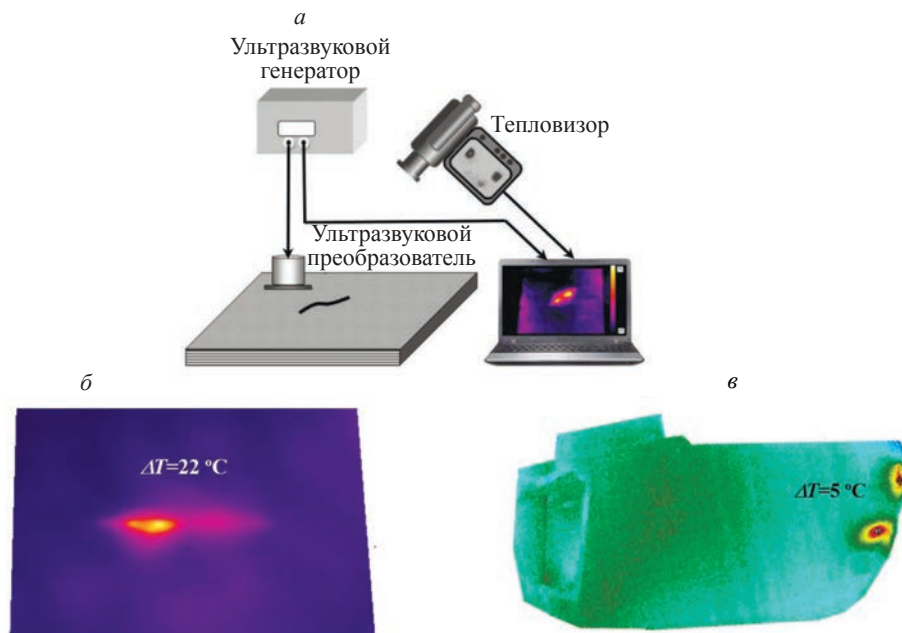


Рис. 4. Примеры ультразвукового ИК-термографического НК (стимуляция мощностью 300 Вт на частоте 22 кГц): а — схема испытаний; б — ударное повреждение (энергия удара 28 Дж) в углепластике; в — выявление усталостных трещин в турбинной лопатке.

берегов трещин, приводя к локальным температурным сигналам до нескольких десятков градусов (см. схему испытаний на рис. 4а). Кроме того, метод термоакустики реализует принцип так называемого «темного поля» (dark field), т.е. в процессе испытаний температура бездефектных областей практически не изменяется. Первые исследования в этой области были выполнены в 1981 г. R.V. Mignogna и др. [70]. В 1994 г. E.G. Henneke и др. ввели термин «вибротермография» [71]. Значительный объем исследований в данной области выполнили Xiouan Nan и др. в Университете Уэйна, США [24, 26, 27, 72]. В ранних отечественных исследованиях по ультразвуковой ИК-термографии использовали магнитострикционные преобразователи мощностью 200—2000 Вт, работавшие на частоте 22 кГц [73]. В настоящее время чаще применяют мощные пьезоэлектрические преобразователи, работающие на частотах 20—60 кГц [25]. Ультразвуковую стимуляцию обычно применяют в течение 3—10 с или в виде краткого импульса (burst). Типичными проблемами данного метода является необходимость сохранять эффективный контакт ультразвукового излучателя с материалом, недопущение повреждения объекта контроля в зоне контакта, а также предотвращение появления стоячих волн, в узлах которых отсутствует накачка акустической энергии и, следовательно, изменение температуры.

В качестве иллюстрации эффективности описываемого способа ТК на рис. 4б, в приведены ИК-термограммы углепластикового композита с ударным повреждением (энергия удара 28 Дж) и турбинной лопатки с усталостной трещиной под теплозащитным покрытием.

Обнаружение поверхностных и подповерхностных трещин в турбинных лопатках, выполненных из жаропрочных сплавов, является важной областью применения ультразвуковой ИК-термографии. Более детальное описание возможностей и проблем этого метода можно найти в [16].

4.4. Индукционная (вихретоковая) ИК-термография

Индукционная электромагнитная стимуляция возбуждает вихревые токи в теплопроводных материалах (металлах и углеродсодержащих композитах), которые концентрируются на краях трещин, приводя к локальным температурным сигналам. Подобно оптическому нагреву, индукционный нагрев может быть непрерывным, модулированным и импульсным, а его мощность может достигать нескольких кВт. В зависимости от контролируемого материала диапазон используемых частот составляет от нескольких килогерц до десятков мегагерц. В индукционной ТК термографии применяют те же методы обработки данных, что и в классическом ТК. Данный метод весьма эффективен

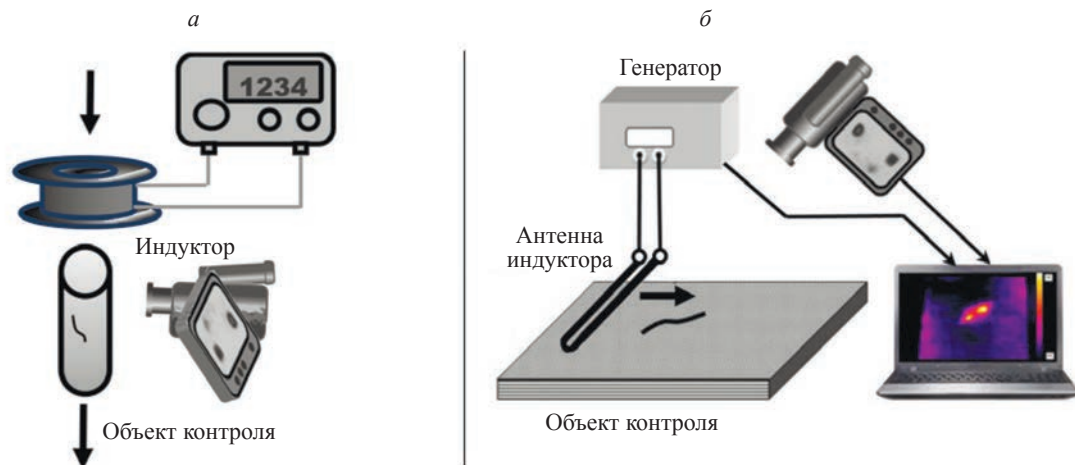


Рис. 5. Индукционная ИК термография:

а — нагрев цилиндрического объекта внутри индуктора; *б* — односторонний нагрев с помощью антенны.

для выявления поверхностных трещин, вокруг которых возрастает мощность вихревых токов, но в ряде случаев также возможно обнаружение подповерхностных дефектов. Наилучшей геометрией нагрева является размещение объекта контроля внутри индуктора (рис. 5*а*), что не всегда удобно на практике. Возможен сканирующий нагрев металлов полосовым индуктором, движущимся вблизи контролируемой поверхности (рис. 5*б*), но в этом случае снижается эффективность нагрева.

Впервые индукционная ИК-термография была предложена для обнаружения поверхностных трещин в стальных заготовках [74]. В 1994 г. R. Lehteniemi и J. Hartikainen разработали портативный тепловой дефектоскоп с индукционным нагревателем [75]. В последние годы активны группы В. Oswald-Tranta в Университете г. Леобена, Австрия [36], U. Netzelmann в Институте неразрушающего контроля, Германия [38]. Коммерческую аппаратуру DEFECTOVISION выпускает фирма Förster, Германия. В Чехии фирма Starmans Electronics разработала автоматизированную установку для контроля заготовок стальных валов, применяемых в автомобилестроении [76]. В Томском политехническом университете выполнены исследования по комбинированному НК с использованием оптического и индукционного нагрева [77]. Метод индукционной ИК-термографии эффективен для контроля турбинных лопаток, сварных швов, кованных изделий (карданных валов, конических шестерен), зубчатых колес, шестерен, эксцентриков и т.д.

5. ОБРАБОТКА ДАННЫХ В ТК

5.1. Помехи и шумы в ТК

Обработку данных в ТК выполняют с целью повышения достоверности испытаний, т.е. для улучшения предельных возможностей метода за счет повышения отношения сигнал/шум, а также для оценки существенных характеристик обнаруженных дефектов, имеющих значение для принятия решения о качестве изделия. С одной стороны, ТК базируется на хорошо сформулированных положениях теорий теплопередачи и теплового излучения, знание которых позволяет разрабатывать физически обоснованные алгоритмы тепловой дефектометрии. С другой стороны, как отмечалось выше, результатом применения большинства процедур активного ТК является куб данных, который чаще всего описываю в виде пиксельных функций $T(i, j, k)$. Следует иметь в виду, что функция T отражает кажущуюся температуру, которая совпадает с истинной только в случае абсолютно черного тела. Иными словами, при анализе результатов ТК в неявном виде присутствует спектральная функция помехи $\varepsilon(i, j, k)$, которая оказывает значительное влияние на результаты ТК (здесь ε есть коэффициент излучения, который согласно закону Кирхгофа численно равен коэффициенту поглощения α на тех же длинах волн). Фактически, с учетом отраженного от объекта излучения сигнал ИК-детектора $U(x, y, \tau)$ может быть выражен формулой (с точностью до постоянного коэффициента) [78]:

$$U(x, y, \tau) \pm \sqrt{\Delta U_D^2} = \varepsilon(x, y) T(x, y, \tau)^n + [1 - \varepsilon(x, y)] T_a(x, y, \tau)^n,$$

где ΔU_D — амплитуда собственного белого шума ИК-детектора, определяющая температурное разрешение тепловизора ΔT_{res} ; n — показатель степени, зависящий от спектральной чувствительности тепловизора; T_a — температура окружающей среды (или температура внешних тепловых источников), в том числе тех, которые используют для нагрева изделия. Коэффициент $\varepsilon(i, j, k)$ в последнем выражении описывает мультипликативную помеху, в то время как второй член выражает внешнюю аддитивную помеху. Концепция шумов и помех в ТК разрабатывается в ТПУ и в кратком изложении сводится к следующему.

Предельные возможности ТК определяются температурным разрешением тепловизора, роль которого возрастает при слабых температурных сигналах в дефектных зонах.

Усредняя ИК термограммы в последовательности по N изображениям, можно улучшить температурное разрешение конкретного тепловизора в $\Delta T_{res} / \sqrt{N}$ раз, однако это приводит к росту инерционности процесса регистрации температуры.

Температурные сигналы в дефектных зонах прямо пропорциональны мощности нагрева, увеличение которой ограничено температурой деструкции контролируемого материала.

Стационарную аддитивную помеху, обусловленную окружающей средой, устраняют вычитанием начальной термограммы из последовательности. Нестационарную аддитивную помеху, создаваемую источником нагрева, снижают физически (путем спектральной фильтрации, экранировки, поворота нагревателя и т.д.).

Мультипликативная помеха связана с оптическими свойствами объекта контроля, включая наличие грязи, пыли, пятен краски, царапин, инородных включений и т.д. Наименьшим уровнем помехи обладают неметаллы. Существенно снизить мультипликативную помеху можно, нанося на контролируемую поверхность однородное покрытие (краску). В ИК диапазоне цвет краски не имеет существенного значения, но при использовании оптического нагрева преимущественно излучением видимого диапазона предпочтительны краски темных цветов.

Мультипликативную помеху описывают контрастом шума, который в идеальном случае характеризует конкретный материал. Однако даже в случае «черных» покрытий контраст шума обычно не бывает ниже 2 %. Это означает, что при избыточной температуре нагрева 50 °С амплитуда излучательной помехи составляет 1 °С.

В реальных процедурах ТК поверхностный шум является нестационарным и, как правило, коррелирует с изменением мощности нагрева. Основным критерием сравнения процедур ТК является отношение сигнал/шум, которое изменяется во времени и достигает максимума в определенный момент времени (оптимальное время контроля).

5.2. Алгоритмы обработки данных

Как отмечено выше, обработка данных в ТК основана либо на многочисленных математических алгоритмах анализа нестационарных сигналов, либо на решениях теории теплопроводности, которые связывают температурные сигналы с ТФХ материала и параметрами скрытых дефектов. Алгоритмы 1-й группы улучшают отношение сигнал/шум; наиболее простой процедурой является фильтрация данных, а именно, двумерная пространственная и одномерная временная фильтрация высокочастотных температурных сигналов $T(x, y, \tau)$, причем используют два типа фильтров: сглаживающие (для подавления шумов) и градиентные (для подчеркивания границ дефектов). Для получения гладких зависимостей температуры от времени применяют полиномиальную фильтрацию функций $T(\tau)$, после чего возможно вычисление производных от температуры по времени. Алгоритмы 2-й группы в основном используют для тепловой дефектометрии. Например, приближенную оценку глубины залегания дефектов в одностороннем ТК выполняют по формуле:

$$l = \sqrt{a\tau_m},$$

следующей из решения задачи нагрева адиабатического полупространства импульсом Дирака (здесь τ_m — время проявления максимального температурного сигнала ΔT_m).

Обе группы вышеупомянутых процедур обработки данных детально рассмотрены в [16] и кратко описаны в табл. 2 вместе с рядом экзотических алгоритмов, разработанных в последние годы.

Различные алгоритмы обычно сравнивают с использованием эталонных образцов, содержащих плоскодонные дефекты, используя критерий отношения сигнал/шум. На рис. 6 приведены результаты, полученные на образце из стеклопластика размером 195×195×9 мм, разработанном Лабораторией передовых систем (ASL), Индия, и содержащем дефекты различного вида (плоскодонные выемки, внутренние воздушные полости, вставки из пенополипропилена и эпоксидного

Таблица 2

Алгоритмы обработки данных в ТК

Алгоритм	Описание	Источник
Усреднение температуры во времени (averaging)	Усреднение функции по N термограммам снижает случайный шум в $\sqrt{N}$ раз	[16]
Двухмерная пространственная фильтрация (2D filtration)	Для устранения однопиксельного шума используют простые маски размером 3×3 — 7×7 . Для подчеркивания границ дефектов применяют фильтры Собеля, Гаусса/Лапласа и т.п.	[16]
Вычитание фона (background subtraction)	Стандартная процедура вычитания из последовательности термограмм при начальной температуре позволяет подавить аддитивную помеху, то есть стационарные внешние засветки	[16]
Нормализация данных (normalization)	При делении термограмм, содержащих дефектные отметки, на термограмму без признаков дефектов возможно подавление мультипликативной помехи. Процедура деления увеличивает высокочастотные шумы	[79]
Раннее обнаружение (early detection)	Данный принцип основан на факте, что диффузия тепла проявляется слабее при малых временах наблюдения, температурные «отпечатки» скрытых дефектов имеют более резкие границы, но амплитуда сигналов ΔT ниже, чем в оптимальные времена наблюдения	[80]
Преобразование Фурье, или импульсная фазовая термография (PPT-Pulse Phase Thermography)	Базовая процедура ТК. К функции $T(\tau)$ применяют преобразование Фурье, переводя исходные термограммы в последовательность фазовых изображений (фазограмм), которые более помехозащищены. Как правило, наиболее информативна первая значимая частота Фурье. Алгоритм не требует выбора бездефектной зоны	[81]
Вейвлет-преобразование (wavelet analysis)	Метод сходен с преобразованием Фурье, но позволяет локализовать сигналы во времени. Применение в ТК фрагментарно. Алгоритм не требует выбора бездефектной зоны	[82]
Преобразование Хью (Hough transform)	Дискриминацию дефектных областей проводят в системе координат <i>Log-Log</i> , в которой функция температуры в бездефектной зоне имеет вид прямой линии. Алгоритм не требует выбора бездефектной зоны	[83]
Преобразование Радона (Radon transform)	Метод аналогичен преобразованию Хью. Алгоритм не требует выбора бездефектной зоны	[84]
Анализ главных компонент (PCA-Principal Component Analysis); новизна — анализ главных компонент с прореживанием данных (sparse PCA)	Базовая процедура ТК. Исходную последовательность термограмм любой длины преобразуют в последовательность главных компонент, отражающих в порядке убывания наиболее статистически значимые характеристики температурного поля изделия. Наибольший объем информации заключается в нескольких первых компонентах. Обычно 1-я компонента отражает неоднородность нагрева, а дефектные отметки содержатся в последующих компонентах	[34]
Полиномиальная аппроксимация	Базовая процедура ТК. Пиксельные функции $T(\tau)$ аппроксимируют полиномами 3—6 порядка, устраняя высокочастотные шумы. Является важной стадией метода Термографической Реконструкции Сигнала (TSR)	[85]
Термографическая реконструкция сигнала (TSR—Thermographic Signal Reconstruction)	Базовая процедура ТК. Способ импульсного ТК (предложен S. Shepard) предусматривает полиномиальное сглаживание функции $T(\tau)$ и вычисление первой и второй производной производных по времени. Обеспечивает термограммы высокого качества. J.-M. Roche и D.L. Balageas распространили алгоритм на случай длительного нагрева	[24, 86]
Синхронная (фазочувствительная, термоволновая) термография (lock-in, phase sensitive, thermal wave thermography)	Комбинация фототермии и ИК-термографии, метод тепловых волн с анализом фазы	[50]
Мультичастотная синхронная термография с синтезом данных (multi-frequency fused thermography)	Нагрев тепловыми волнами различной частоты с фазовым анализом и синтезом данных	[87]
Частотно-модулированная визуализация тепловых волн (FMTWI—frequency modulated thermal wave imaging)	Частотная модуляция позволяет варьировать глубину проникновения тепловых волн для выявления различных дефектов в одном эксперименте. Метод сочетается с различными алгоритмами обработки данных (корреляция, окно Гаусса, импульсная компрессия и др.)	[53, 88]

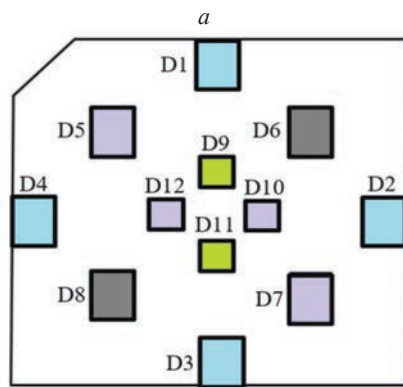
Продолжение табл. 2

Корреляция (correlation)	Базовая процедура ТК. Корреляцию осуществляют во времени между пиксельными функциями в дефектной и бездефектной областях, а также возможна автокорреляция. Алгоритм снижает уровень мультипликативной помехи	[16]
Динамическая тепловая томография (dynamic thermal tomography)	Разработано множество томографических принципов с использованием ИК-излучения. Динамическая тепловая томография основана на эффекте запаздывания сигналов ΔT_m с ростом глубины дефектов при одностороннем ТК. Тепловые томограммы показывают распределение дефектов по нескольким (3—5) слоям и являются вспомогательным средством анализа сложных дефектов, например, ударных повреждений	[89]
3D-тепловая томография (3D thermal tomography)	Предложен основанный на Байесовской инверсии алгоритм для определения температурного отклика поверхности, нагреваемой последовательно в нескольких точках, в результате чего определяют ТФХ материала и положение скрытых неоднородностей	[90]
Синтетическая термография на основе анализа времени распространения («пролета») тепловых сигналов (STTOF — Synthetic Thermal Time-of-Flight)	Способ ТК, позволяющий преобразовывать исходные последовательности в изображения глубин залегания дефектов («глубинограммы») путем анализа точек перегиба на кривых $T(\tau)$. Бездефектное изделие рассматривают как полубесконечное тело, а дефекты — как тонкие пластины	[91]
Метод восстановленного псевдо-теплого потока (RPHF- restored pseudo heat flux)	На основе решения задачи нагрева покрытия на подложке лазерным непрерывным пучком предложено определять толщину покрытия по временному псевдопрофилю пучка. Обратная задача решена с помощью нейронной сети, реализующей алгоритм опорной векторной регрессии (SVR-Support Vector Regression)	[92]
Термография с использованием синхронного детектирования и «самоэталонирования» (self-reference lock-in thermography)	При испытаниях механически нагруженных объектов предложен принцип синхронного детектирования, в котором в качестве опорного сигнала служит изменение температуры бездефектной зоны объекта контроля	[93]
Анализ термоупругих напряжений (TSA-Thermal Stress Analysis)	Базовая процедура ТК. ИК-термография для анализа распределения напряжений и развития усталостных трещин	[55]
Нейронные сети (neural networks)	Расширяющееся использование искусственного интеллекта позволяет решать многопараметрические задачи идентификации дефектов. Требуется представительная обучающая выборка для конкретных задач НК. Перспективное направление в ТК	[94]
Синтез данных (data fusion)	Развивающаяся концепция НК, использующая преимущества отдельных видов НК (например, ТК пригоден для обнаружения дефектов в «мертвой» зоне ультразвукового контроля)	[95, 96]
Параметрическая и непараметрическая реконструкция отдельных термограмм (parametric and non-parametric single image reconstruction)	При использовании активного ТК в медицинской диагностике предложены алгоритмы повышения теплового контраста, например, при термографировании вен	[97]
Подход Тагучи к проектированию тепловых дефектоскопов (Taguchi approach)	Метод Тагучи включает оптимизацию проектирования на 3-х уровнях: 1) системное проектирование; 2) параметрическое проектирование; 3) проектирование с учетом допусков	[98]

клея) размером 10×10 и 20×20 мм (рис. 6а). Образец нагревали двумя галогенными лампами общей мощностью 2 кВт в течение 10 с. Примеры эффективности обработки данных, выполненной с помощью программы ThermoFit Pro (Томский политехнический университет), приведены на рис. 6б—д. Параметры отдельных алгоритмов не приводятся, поскольку данные приведены с иллюстративной целью. Сравнение данных выполнено восемью обученными операторами по критерию Танимото:

$$TC = \frac{N_{r.d.} - N_{m.d.}}{N_{r.d.} - N_{f.d.}},$$

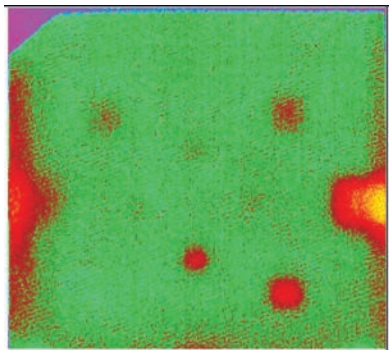
где $N_{r.d.}$, $N_{m.d.}$, $N_{f.d.}$ — количества обнаруженных оператором реальных, пропущенных и ложных дефектов. Краткие комментарии к рис. 6 сводятся к следующему. Для оптимальной термограммы на рис. 6б: $N_{r.d.} = 12$, $N_{m.d.} = 3$, $N_{f.d.} = 0$ и $TC = 9/12$, или 75 %. Фазограмма Фурье на 1-й значимой



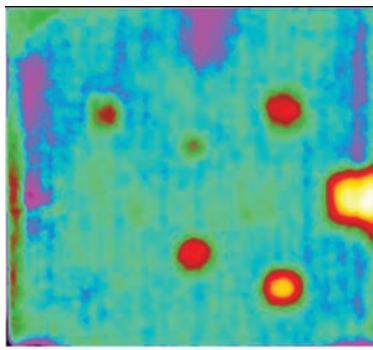
D1—D4: Плоскостные выемки
D5, D7, D10, D12: Вставки пенополипропилена
D6, D8: Вставки эпоксидного клея
D9, D11: Внутренние воздушные дефекты

Схема дефектов

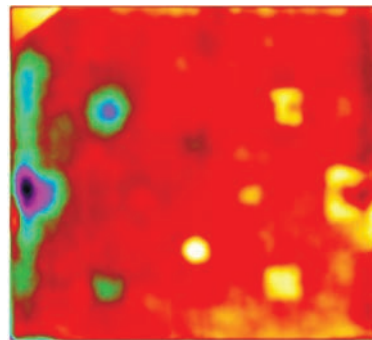
б



в



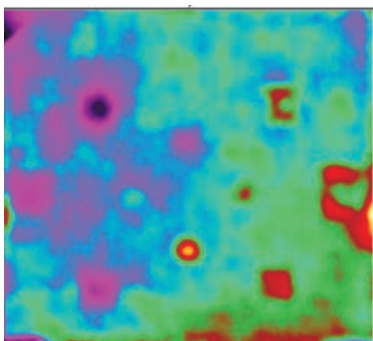
г



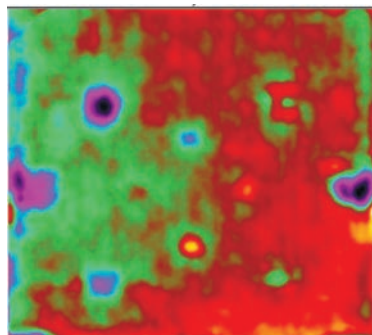
д



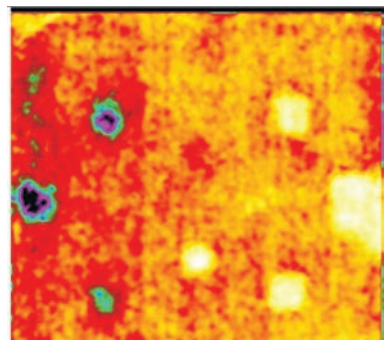
е



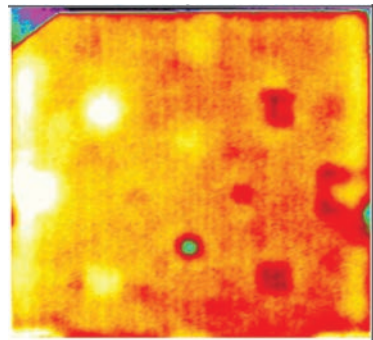
ж



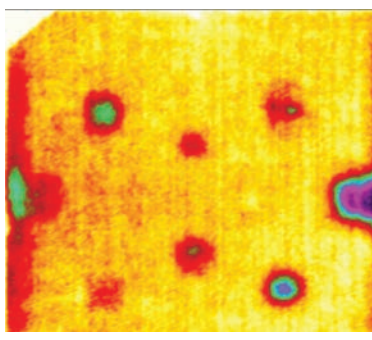
з



и



к



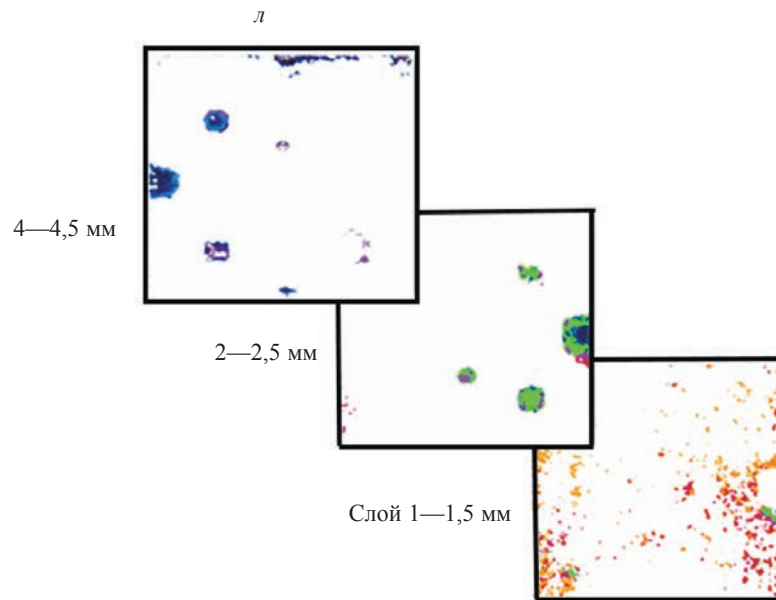


Рис. 6. Эффективность алгоритмов обработки ИК-термограмм в ТК (стандартный образец из стеклопластика толщиной 9 мм с дефектами различных видов):

a — схема дефектов; *б* — оптимальная термограмма ($TC = 75\%$); *в* — фазограмма Фурье ($TC = 50\%$); *г* — 2-я главная компонента (МАГК, $TC = 83\%$); *д* — бинаризация 5-й главной компоненты с помощью фильтра Собеля (МАГК, $TC = 50\%$); *е* — полиномиальная аппроксимация, 1-й коэффициент полинома 3-й степени ($TC = 83\%$); *ж* — полиномиальная аппроксимация, 5-й коэффициент полинома 5-й степени ($TC = 83\%$); *з* — авто-коррелограмма ($TC = 64\%$); *и* — TSR-метод, 1-я производная ($TC = 92\%$); *к* — TSR-метод, 2-я производная ($TC = 67\%$); *л* — тепловые томограммы трех слоев.

гармонике показала изображение высокого качества, но с относительно небольшим количеством обнаруженных дефектов (рис. 6в, $TC = 83\%$). Весьма эффективным является метод анализа главных компонент — МАГК (рис. 6г, $TC = 50\%$). Рис. 6д иллюстрирует бинарную карту дефектов, полученную с помощью маски Собеля, однако пороговая фильтрация снизила количество обнаруженных дефектов до шести. Результаты, аналогичные МАГК, получены путем аппроксимации температурных профилей полиномом 3-й степени (рис. 6е), причем 1-й полиномиальный коэффициент обеспечил $TC = 83\%$. Близкие результаты отмечены в пятом коэффициенте полиномиальной функции пятой степени (рис. 6ж, $TC = 83\%$). Изображение коэффициента автокорреляции обеспечило величину критерия Танимото на уровне 64 % (рис. 6з). Наибольшую эффективность показало изображение первой производной, полученное по методу TSR (рис. 6и, $TC = 92\%$), в то время как изображение второй производной характеризовалось $TC = 67\%$ (см. рис. 6к). Тепловые томограммы на рис. 6л позволили визуализировать дефекты в трех слоях изделия на глубине до 4,5 мм.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В мировом и отечественном НК последнее десятилетие характеризовалось ростом интереса к активному ТК, в особенности, если речь идет о композиционных и сотовых материалах авиакосмического профиля. Слоистый характер таких материалов предполагает возникновение тонких воздушных дефектов с преобладающими размерами в направлении, параллельном поверхности изделия. Тепловой контроль особенно эффективен для обнаружения расслоений в приповерхностных слоях, которые могут попадать в мертвую зону ультразвукового НК, включая теплозащитные покрытия толщиной 0,05—0,3 мм на металлической подложке. Предельная глубина выявления таких дефектов в односторонней процедуре ТК составляет 3—4 мм при поперечных размерах дефектов около 10 мм, в то время как двухсторонняя процедура обеспечивает контроль по всей глубине изделий толщиной 10—15 мм. Другим видом дефектов, эффективно обнаруживаемых с помощью ТК, является вода в сотовых структурах, которая создает специфические дефектные отметки, легко идентифицируемые оператором. Тепловой контроль предоставляет широкое поле для применения методов обработки данных, которые могут обладать физическим смыслом, если они связаны с теорией теплопередачи, или являться чисто математическими алгоритмами обработ-

ки зашумленных нестационарных процессов. Тем не менее эффективность сложных алгоритмов, применяемых для повышения отношения сигнал/шум, зачастую преувеличена; иными словами, «сырые» термограммы, полученные в оптимальный момент времени с помощью высококачественных тепловизоров, могут достаточно эффективно анализироваться операторами. Подавление помех осуществляют путем окрашивания изделий, а также разделением в пространстве тепловизора и источника нагрева. Но основная ценность специфической обработки результатов ТК заключается в возможности дефектометрии, роль которой возрастает в количественном НК.

Потенциал современного ТК связан с существенным прогрессом в области тепловизоров и тепловизионных модулей, на базе которых возможно создание роботизированных комплексов, предназначенных для фрагментарного контроля поверхности больших изделий. В то же время возродился интерес к сканирующему ТК при испытаниях крупногабаритных изделий цилиндрической и конической формы с использованием линейных источников нагрева. Для принятия решения о качестве изделий по результатам ТК успешно применяют нейронные сети, которые особенно эффективны при испытаниях однотипных изделий. С процессом обучения нейронных сетей связана до сих пор не решенная проблема создания и аттестации эталонных (контрольных, стандартных) образцов.

Автор благодарен А.О. Сиддикуи за предоставленный оригинальный эталонный образец композита с дефектами различной природы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2023-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fourier J.* Théory du mouvement de la chaleur dans les corps solides, 1er partie // Mémoires de l'Académie des Sciences. 1824. V. 4. P. 185—555. 1826. V. 5. P. 153—246.
2. *Ångström M.A.J.* New method of determining the thermal conductivity of bodies // Phil. Mag. 1863. No. 25. P.130—142.
3. *Hudson R.D.* Infrared system engineering. Wiley-Interscience. 1969. 530 p.
4. *Lloyde J.M.* Thermal imaging systems. Plenum Press. New York. USA. 1979. 456 p.
5. *Accetta Joseph S., Shumaker David L.* The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook / Exec. Editors. V. 1-8. SPIE Optical Engineering Press. Bellingham, Washington, 1993.
6. *Vollmer M., Möllmann K.-P.* Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, research and applications. Wiley-VCH, Germany, 2010.
7. *Minkina W., Dudzik S.* Infrared Thermography: Errors and uncertainties. Wiley, 2009.
8. Nondestructive Testing Handbook, A.S.N.T. U.S.A. 2001. V. 3. Infrared and Thermal Testing. 714 P.
9. Infrared methodology and technology. Nondestructive testing monographs and tracts. Gordon and Breach Science Publishers, U.S.A. 1994. V. 7. 526 p.
10. *Maldaque X.* Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography. Springer—Verlag, London, 1993. 440 p.
11. *Almond D., Patel P.* Photothermal science and techniques. London: Chapman and Hall, 1996. 230 p.
12. *Maldaque 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. 682 p.
13. *Daniels A.* Field guide to infrared systems. SPIE Press, Washington, USA. 2006. 120 P.
14. *Kaplan H.* Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. Tutorial Texts in Optical Engineering, SPIE Press V. TT34, 1999, USA. 164 p.
15. *Breitenstein O., Warta W., Langekamp M.* Lock-in thermography. Springer Series in Advanced Microelectronics. V. 10. Springer, 2010. 250 p.
16. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД «Спектр», 2015. 545 с.
17. *Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В.* Тепловой контроль. М.: ИД «Спектр», 2011.
18. *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.
19. *Vavilov V., Burleigh D.* Infrared thermography and thermal nondestructive testing. Springer Nature, 2019. 595 p.
20. *Чернышева Т.И., Чернышев В.Н.* Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. М.: Машиностроение, 2001. 194 с.
21. *Cramer E., Winfree W., Hodges K.L., Koshti A.* Status of thermal NDT of space shuttle materials at NASA // Proc. SPIE. April 2006. V. 6205. 9 p. DOI:10.1117/12.669684
22. *Vavilov V.P., Burleigh D.D.* Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing // NDT & E International. 2015. V. 73. P. 28—52.
23. *Maldaque X.P., Zolotoyabko E.* Theory and practice of infrared vision (2nd ed.) / Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, John Wiley & Son Publ., 2016. 780 p.

24. Siegel J., Beemer M.F., Shepard S. Automated non-destructive inspection of fused filament fabrication components using Thermographic Signal Reconstruction // Additive Manufacturing. Nov. 2019. V. 31. P. 100923. DOI:10.1016/j.addma.2019.100923
25. Чулков А.О., Нестерук Д.А., Шагдыров Б.И., Вавилов В.П. Метод и аппаратура инфракрасного и ультразвукового термографического контроля крупногабаритных композиционных изделий сложной формы // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 67—74. DOI: 10.31857/S0130308221070083
26. Obeidat O., Qiuye Yu, Favro L., Xioyan Han. The Effect of heating duration on the quantitative estimation of defect depth using sonic infrared imaging // J. Nondestruct. Eval. Diagnost. and Prognostics of Eng. Systems. March 2021. V 4 (4). P. 1—7. DOI:10.1115/1.4050353
27. Xiaoyan Han, Jianping Liu, Islam Md. S. Sonic infrared imaging NDE, Proceedings of SPIE / The International Society for Optical Engineering. May 2005. V. 5765. P. 142—147. DOI:10.1117/12.600118
28. Holland S., Schiefelbein B. Model-based inversion for pulse thermography // Exp. Mech. 2019. V. 59 (4). P. 413—426. DOI: 10.1007/s11340-018-00463-2
29. Holland S.D. First measurements from a new broadband vibrothermography measurement system // Rev. of Quant. Nondestruct. Evaluation. 2007. V. 26. P. 478—483.
30. Zalameda J.N., Winfree W. Passive thermography measurement of damage depth during composites load testing // Frontiers in Mech. Eng. Apr. 2021. V. 7. P. 651149. DOI:10.3389/fmech.2021.651149
31. Cramer E.K., Winfree W. The application of principal component analysis using fixed eigenvectors to the Infrared thermographic inspection of the space shuttle thermal protection system / Proc. Quantitative InfraRed Thermography Conf. January 2006. DOI:10.21611/qirt.2006.002
32. Sun J.G. Quantitative thermal tomography imaging of complex material structures / AIP Conference Proceedings. 2012. V. 1430. P. 507. DOI: 10.1063/1.4716269
33. Roche J.-M., Balageas D.L. Common tools for quantitative time-resolved pulsed and step-heating thermography- part 1: theoretical basis // Quant. Infrared Thermography J. 2014. V. 11. P. 43—56.
34. Rajic N. Principal Component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures // Composite Structures. Dec. 2002. V. 58 (4). P. 521—528. DOI:10.1016/S0263-8223(02)00161-7
35. 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. Sept. 2017. V. 59 (9). P. 473—478. DOI: 10.1784/insi.2017.59.9.473
36. Metz C., Franz P., Fischer C., Wachtendorf V., Maierhofer C. Active thermography for quality assurance of 3D-printed polymer structures / In: Proc. 14th Intern. Conf. Quant. Infr. Thermogr. June 2018. Berlin, Germany. NDT. net Issue: 2019-05. DOI:10.3390/app12125851
37. Tuschl C., Oswald-Tranta B., Eck S. Scanning inductive thermographic surface defect inspection of long flat or curved work-pieces using rectification targets // Appl. Sciences. 2022. V. 12 (12). P. 5851.
38. Mayr G., Plank B., Gruber J., Sekelja J., Hendorfer G. Quantitative evaluation of the effective thermal diffusivity for model-based porosity prediction in CFRP // Quant. Infr. Thermogr. J. 2016. V. 13 (1). P. 70—82. DOI: 10.1080/17686733.2015.1093310
39. Netzelmann U., Walle G., Lugin S., Ehlen A., Bessert S., Valeske B. Induction thermography: principle, applications and first steps toward standardization // Quant. Infr. Thermogr. J. 2016. V. 13. No. 2. P. 170—81. DOI: 10.1080/17686733.2016.1145842
40. Ryu M., Batsale J.-C., Morikawa J. Modelling of dual lock-in method for the simultaneous measurements of thermal diffusivity and thermal effusivity // Intern. J. Heat and Mass Transfer. Dec. 2020. V. 162. P. 120337. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120337
41. Alhammad M., Avdelidis N.P., Ibarra-Castaneda C., Torbali M.E., Genest M., Zhang H., Zolotas A., Maldague X.P. Automated impact damage detection technique for composites based on thermographic image processing and machine learning classification // Sensors. 2022. V. 22 (23). Article No. 9031.
42. Nowakowski A., Kaczmarek M. Active dynamic thermography in medical diagnostics / In: Application of Infrared to Biomedical Sciences. Eds. E.Y. Ng and M. Etehad Tavakol. Springer Nature, Singapore. March 2017. P. 291—310. DOI:10.1007/978-981-10-3147-2_17
43. Gryś S., Minkina W. Noninvasive methods of active thermographic investigation: Short overview of theoretical foundations with an example of application // Energies. 2022. V. 15. P. 4865. DOI: 10.3390/en15134865
44. Świdorski W. IR Thermography nondestructive testing methods of composite materials used in aerospace applications / Proc. Quantitative InfraRed Thermography Asia Conf. Jan. 2015. 7 p. DOI:10.21611/qirt.2015.0016
45. Gliścińska E., Michalak M., Krucińska I., Strakowska M., Kopeć M., Więcek B. A new thermographic method for determining the thickness of the polymer surface layer in sound-absorbing fibrous composite materials // Polymer Testing. Aug. 2022. V. 115 (2). P. 107748.
46. Steenackers G., Peeters J., Janssens K. Sublayer composition evaluation of Artwork using active thermography / In: Proc. 14 Intern. Conf. on Quant. Infr. Thermogr. Berlin, Germany. June 2018.
47. 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 // Infr. Phys. & Techn. 2019. V. 102. P. 103047. DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103047

48. *Venegas P., Peran J., Usamentiaga R., De Ocariz I.S.* NDT inspection of aeronautical components by projected thermal diffusivity analysis / Proc. 14th International Conference on Quant. Infr. Thermography 2018, June, Berlin, Germany. NDT.net Issue: 2019-05.
49. *Cernuschi F., Bison P.* Thirty years of thermal barrier coatings (TBC). Photothermal and thermographic Techniques: Best practices and lessons learned // J. Thermal Spray Techn. March 2022. V. 31 (3). 30 p. DOI:10.1007/s11666-022-01344-w
50. *Meola C., Carlomagno G.M., Squillace A., Vitiello A.* Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography // Measurement Science and Technology. 2006. V. 13. No. 3. P. 380—389. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2005.02.007
51. *D'Accardi E., Palumbo D., Tamborrino R., Cavallo P., Galietti U.* Pulsed Thermography: evaluation and quantitative analysis of defects through different post-processing algorithms. NDT.net Issue: 2019-05. Proc. 14th Intern. Conf. on Quant. Infr. Thermography-2018, 25-29 June 2018, Berlin, Germany. NDT.net Issue: 2019-05.
52. *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. Sept. 2022. V. 126. P. 104350. DOI:10.1016/j.infrared.2022.104350
53. *Mulaveesala R., Tuli, S.* Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection // Applied Physics Letters. 2006. V. 89 (19). Art. No. 191913.
54. *Park H.-S., Choe M.-Y.* Research trends in infrared thermography NDT — Ultrasound infrared thermography technology // J. Korean Soc. Nondestr. Test. 2012. V. 32 (3). P. 307—313. DOI: 10.7779/JKSNT.2012.32.3.307
55. *Uchida Y., Shiozawa D., Hori M., Kobayashi K., Sakagami T.* Advanced technique for thermoelastic stress analysis and dissipation eEnergy evaluation via visible-infrared synchronous measurement // Experimental Mechanics. March 2022. V. 62 (3). P. 459—470.
56. *Runshi Zhang, Xingwang Guo, Mingyuan He.* Intelligent pseudo solder detection in PCB using laser-pulsed thermography and neural network // IEEE Sensors J. Nov. 2021. V. 22. No. 1. P. 631—638. DOI:10.1109/JSEN.2021.3129064
57. *Jue Hu, Hai Zhang, Sfarra S., Gargiulo G., Avdelidis N.P., Mingli Zhang, Yang D., Maldague X.* Non-destructive imaging of marqueteries based on a new infrared-terahertz fusion technique // Infrared Physics & Technology. June 2022. V. 125 (9). P. 104277. DOI:10.1016/j.infrared.2022.104277
58. *Fernandes H.C., Herrman H.-G., Hai Zhang, Goyo F., Nativio Del Pra J.H., Tarpani J.R.* Infrared thermography for impact damage analyses on curved CFRP laminates used in geostationary satellites / In: Proc. 5th Brazilian Conference on Composite Materials – BCCM 5. Jan. 2021. Sao Carlos, Brazil. 7 p.
59. *Panella F.W., Pirinu A.* Application of Pulsed Thermography and Post-processing Techniques for CFRP Industrial Components // J. Nondestruct. Eval. 2021. V. 40. P. 52. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00776-8>
60. *Будадин О.Н., Кульков А.А., Козельская С.О.* Способ теплового контроля композитных материалов / Патент РФ № RU 2616438 C1, рег. 23.05.2016, публ. 14.04.2017.
61. РД-13-04-2006 Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Серия 28. Выпуск 11/ Колл. авт. Под общ. ред. Пуликовского К.Б. М.: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2007, 32 с.
62. *Чернышев В.Н., Однолько В.Г., Чернышев А.В.* Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий. М.: ИД «Спектр», 2012. 201 с.
63. *Пономарев Д. Б., Захаренко В.А., Абрамова Е.В.* Анализ погрешностей при пирометрических измерениях в производственных условиях // Омский научный вестник. 2019. № 5. С. 94—99. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-94-99
64. *Котовицков И.О.* Разработка методики активного теплового контроля вертолётных лопастей из композиционных материалов / Дисс. ... на соискание уч. степени канд. техн. наук. С.-Петербург: ИТМО, 2022. 287 с.
65. *Roemer J., Pieczonka L., Uhl T.* Laser spot thermography of welded joints. Diagnostyka, 2014. V. 15. No. 2. P. 43—49.
66. *Mashkov P., Pencheva T., Gyoch B.S.* Reflow soldering processes development using infrared thermography / Proc. 32nd Intern. Spring Seminar on Electronics Techn. June 2009. DOI:10.1109/ISSE.2009.5207020
67. *Стороженко В.А.* Исследование метода и разработка средств активного теплового контроля неметаллических материалов / Автореферат канд. дисс. Винница: Политехн. институт, 1979. 23 с.
68. *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 // J. Nondestruct. Eval. 2021. V. 40. Article No. 44. DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y
69. *Thomson W. (Lord Kelvin).* On the dynamical theory of heat / Transactions of the Royal Society of Edinburgh. 1853. V. 20. P. 261—283.

70. Mignogna R.B., Green R.E., Duke J., Henneke E.G., Reifsnider K.L. Thermographic investigations of high-power ultrasonic heating in materials / Ultrasonics. 7. Guildford, Surrey, UK: IPS Science and Technology Press, 1981. P. 159—163.
71. Henneke E.G. II, Russell S.S. Vibrothermography / Nondestructive Testing Handbook, 2nd ed. Special Nondestructive Testing Methods. Columbus, OH, USA: American Society for Nondestructive Testing, 1994. V. 9. P. 336—340.
72. Xiaoyan Han, Jianping Liu, Md. S. Islam. Sonic infrared imaging NDE / Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering. May 2005. V. 5765. P. 142—147. DOI:10.1117/12.600118
73. Vavilov V., Nesteruk D. Comparative analysis of optical and ultrasonic stimulation of flaws in composite materials // Rus. J. NDT. 2010. V. 46. No. 2. P. 147—152.
74. Kremer K.-J. A new technique for online testing of steel products for surface defects / Proc. 3rd European Conf. on Nondestr. Testing. 15—18 Oct. 1984. Florence, Italy. P. 171—186.
75. Lehtiniemi R., Hartikainen J. An application of induction heating for fast thermal nondestructive evaluation // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. P. 2099—2101.
76. Starman S., Matz V. Automated system for crack detection using infrared thermographic testing / Proc. 4th Intern. CANDU In-service Inspection Workshop and NDT Conf. June 18—21 2012. Toronto, Canada. 7 p. https://www.ndt.net/article/ndt-canada2012/content/papers/19_Starman.pdf.
77. Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., Oswald Tranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V. The detection and characterization of defects in metal/nonmetal sandwich structures by thermal NDT, and a comparison of areal heating and scanned linear heating by optical and inductive methods // J. Nondestr. Eval. 2021. V. 40 (44). DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y
78. Vavilov V.P. Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing // NDT & E Intern. Jan. 2014. V. 61. P. 16—23.
79. Degiovanni A., Lamine A.-S., Houlbert A.-S., Maillet D. Identification of subsurface defects using a sensibility analysis / Proc. 4th Europ. Conf. on Comp. Mater. Stuttgart, Germany, 25—28 Sept. 1990. P. 691—695.
80. Krapez J.-C., Balageas D.L. Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography / Proc. Quant. Infr. Thermography QIRT-94, Eurotherm Seminar #42, Sorrento. Italy. 23—26 August 1994. P. 260—266.
81. Maldague X., Marinetti S. Pulse phase infrared thermography // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. P. 2694—2698.
82. Galmiche F., Vallerand S., Maldague X. Wavelet transform applied to pulsed phase thermography / Proc. V-th Workshop on Advances in Infrared Technology and Applications. Ed. by E. Grinzato, P. Bison and A. Mazzoldi, CNR, Venice, Italy 1999. P. 117—122.
83. 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. 620514—1-12.
84. 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.
85. Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Vavilov V. Non-destructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography / Res. in NDE. Springer-Verlag, New York. 1994. V. 5 (4). P. 257—271.
86. Shepard S. Temporal noise reduction, compression and analysis of thermographic image data sequences. U.S. Patent No. 6516084. 2003.
87. Yanjie Wei, Yimin Ye, Hongjun He, Zhilong Su. Multi-frequency fused lock-in thermography in detecting defects at different depths // J. Nondestruct. Eval. Aug. 2022. V. 41 (3). DOI:10.1007/s10921-022-00889-8
88. Kaur K., Mulaveesala M. An efficient data processing approach for frequency modulated thermal wave imaging for inspection of steel material // Infr. Phys. & Techn. Dec. 2019. V. 103. P. 103083. DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103083
89. Vavilov V.P., Shirayev V.V., Kuimova M.V. Time- and phase-domain thermal tomography of composites // Photonics 2018. V. 5 (4). P. 31. DOI: 10.3390/photonics5040031
90. 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 // Inter. J. Heat & Mass Transf. Nov. 2014. V. 78. P. 1126—1134.
91. Ringermacher H.I., Howard D.R., Knight B. Thermal imaging NDT at General Electric / 18th WCNDT. 16—20 April 2012 Durban, South Africa. 4 p. (available on CD).
92. Hongjin Wang, Sheng-Jen Hsieh. 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 // J. Nondestr. Eval. 2018. V. 37. P. 78. DOI: 10.1007/s10921-018-0535-8
93. 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 // Quant. Infr. Thermography Journal. 2010. V. 7 (1). P. 73—84.
94. Ciliberto A., Cavaccini G., Salvetti O. et al. Porosity detection in composite aeronautical structures // Infr. Phys. & Techn. 2002. V. 43. P. 139—143.

95. *Shark L.K., Matuszewski B.J., Smith J.P., Varley M.R.* Automatic feature-based fusion of ultrasonic, radiographic and shearographic images for aerospace NDT // *Insight*. 2001. V. 43 (9). P. 607—615.
96. *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 // *J. of Nondestruct. Eval.* Jan. 2016. V. 35 (18). P. 160—174. DOI:10.1007/s10921-015-0331-7
97. *Saxena A., Raman V., Ng E.Y.K.* Study on methods to extract high contrast image in active dynamic thermography // *Quant. Infrared Thermogr. J.* 2019. V. 16 (3-4). P. 343—259. DOI: 10.1080/17686733.2019.1586376
98. *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 // *J. Nondestruct. Eval.* 2017. V. 36. P. 72. DOI: 10.1007/s10921-017-0450-4
-