

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВИЗОРОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ АКТИВНОМ ТЕПЛОВИЗОРНОМ КОНТРОЛЕ РАССЛОЕНИЙ В НЕМЕТАЛЛАХ

© 2023 г. Д.Ю. Кладов¹, А.О. Чулков^{1,*}, В.П. Вавилов¹, В.И. Стасевский¹, В.А. Юркина¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: *chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023; после доработки 29.05.2023
Принята к публикации 02.06.2023

Описаны результаты применения тепловизоров шести типов, т.е. обладающих различными техническими характеристиками (с матрицей от 160×120 до 640×512 и чувствительностью от 25 до 110 мК) и различного ценового сегмента, для активного теплового контроля (ТК) расслоений размерами от 5×5 до 45×45 мм, расположенных на глубине 3,1 мм в контрольном образце из полиметилметакрилата. Эффективность ТК определена с участием девяти операторов-термографистов. Продемонстрировано, что приемлемые результаты ТК возможны при использовании тепловизоров и тепловизионных модулей бюджетного сегмента.

Ключевые слова: тепловой контроль, расслоение, тепловизор, дефект, контрольный образец.

DOI: 10.31857/S0130308223070035, **EDN:** DVSICD

ВВЕДЕНИЕ

Активный тепловой неразрушающий контроль (НК) находит все большее применение как за рубежом, так и в России, при испытаниях полимерных композиционных материалов, сотовых структур, теплозащитных покрытий, материалов и изделий, изготовленных методом аддитивных технологий и т.п. объектов современных высокотехнологических отраслей промышленности [1—4]. Преимуществами теплового контроля (ТК) являются его применимость к различным материалам и их комбинациям, бесконтактность, высокая производительность и наглядность представления результатов [5—8]. Односторонний ТК наиболее эффективен для выявления приповерхностных дефектов, в частности, на глубинах, попадающих в «мертвую зону» ультразвукового (у.з.) НК. Предельная глубина обнаружения дефектов зависит от многих факторов и, например, для авиационных композитов достигает 4 мм, хотя дефекты с поперечными размерами 10×10 мм и толщиной от 0,3 мм могут быть выявлены и на больших глубинах, в особенности при использовании современных алгоритмов обработки результатов испытаний. Отдельно следует отметить способ у.з. инфракрасной (ИК) термографии, предусматривающий стимуляцию дефектов мощным ультразвуком. Такой способ позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные трещины с микрометровым раскрытием [9, 10].

В связи с появлением на рынке широкой номенклатуры измерительной тепловизионной техники разработчики и пользователи ТК сталкиваются с проблемой оптимального выбора ИК-тепловизоров (или тепловизионных модулей), обеспечивающих выявление требуемых дефектов с учетом технических характеристик и стоимости аппаратуры. В настоящей статье описаны результаты применения шести тепловизоров, обладающих различными техническими характеристиками и входящими в различные ценовые сегменты, для НК расслоений в многослойном образце из полиметилметакрилата (ПММА).

ТЕПЛОВИЗОРЫ

В исследовании использовали 6 тепловизоров, которые можно условно разделить на три уровня: инспекционные Testo 875 и Opgal ThermApp, лабораторные Optris PI450, Optris PI640 и FLIR A325 и исследовательский прибор FLIR SC7700 (см. рис. 1). Инспекционные тепловизоры представляют собой класс бюджетных измерительных приборов ценой 2—3 тысячи долларов США, цены на лабораторные тепловизоры варьируются от 4—20 тысяч долларов США, в то время как цена исследовательских тепловизионных систем может превышать 100 тысяч долларов.

В табл. 1 приведены технические характеристики использованных тепловизоров, которые существенны при их использовании в задачах активного ТК.



Рис. 1. Тепловизоры, использованные в сравнительных испытаниях.

Таблица 1

Технические характеристики тепловизоров

Параметры	Testo 875 [11]	Opgal ThermApp [12]	Optris PI450 [13]	Optris PI640 [14]	FLIR A325 [15]	FLIR SC7700 [16]
Размер матрицы, пикселей	160 × 120	384 × 288	382 × 288	640 × 480	320 × 240	640 × 512
Тип матрицы	Микро- болومتر	Микро- болومتر	Микро- болومتر	Микро- болومتر	Микро- болومتر	Охлаждаемая QWIP
Длина волны, мкм	8 — 14	7,5—14	8 — 14	8 — 14	7,5—13	7,7—9,1
Температурная чувстви- тельность, мК	110	70	40	40	50	25
Погрешность	±2 °С или ±2 %, что больше	± 1°С или ± 1 %, что больше				
Частота кадров, Гц	9	8,7	80	32	60	115
Габаритные размеры, мм	152×108×262	55×65×40	45×45×60	46×56×90	170×70×70	253×130×168
Масса, кг	0,9	0,123	0,237	0,269	0,7	4,950
Ценовой сегмент, тыс. руб.*	140	230	700	950	800	7000

*Ориентировочная цена в апреле 2023 г.

Следует отметить, что тепловизор Testo 875 наименее пригоден для активного ТК, в том числе в качестве составной части тепловых дефектоскопов, что связано с отсутствием возможности пря-

мого сохранения записанных термограмм в память компьютера и, как следствие, невозможностью регистрации последовательностей термограмм с заданным интервалом записи. В настоящем исследовании этот тепловизор был использован в качестве прибора с наихудшим пространственным разрешением (матрицей наименьшего размера). Также следует отметить, что программное обеспечение тепловизора Opgal ThermApp было доработано для обеспечения записи термограмм в память смартфона с заданной частотой с помощью оригинального Android-приложения.

КОНТРОЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ

Экспериментальные исследования были проведены на контрольном образце, который представлял собой пластину размерами 300×130×8,3 мм (рис. 2) и состоял из четырех слоев ПММА, соединенных двухсторонней клейкой лентой. Образец содержал девять искусственных дефектов в виде расслоений с поперечными размерами от 5×5 до 45×45 мм, толщиной 1 мм, расположенных на глубине 3,1 мм от контролируемой поверхности. Для исключения влияния частичной оптической прозрачности ПММА поверхность образца была окрашена черной матовой краской, что обеспечило коэффициент излучения на уровне около 0,96. При выборе типа материала и размеров дефектов контрольного образца руководствовались близостью теплофизических свойств ПММА к типичным композитам и требованиями к предельным размерам обнаруживаемых расслоений в авиационных материалах (10×10 мм). Глубину дефектов выбрали близкой к порогу обнаружения расслоений в углепластике в процедуре одностороннего ТК (около 4 мм).

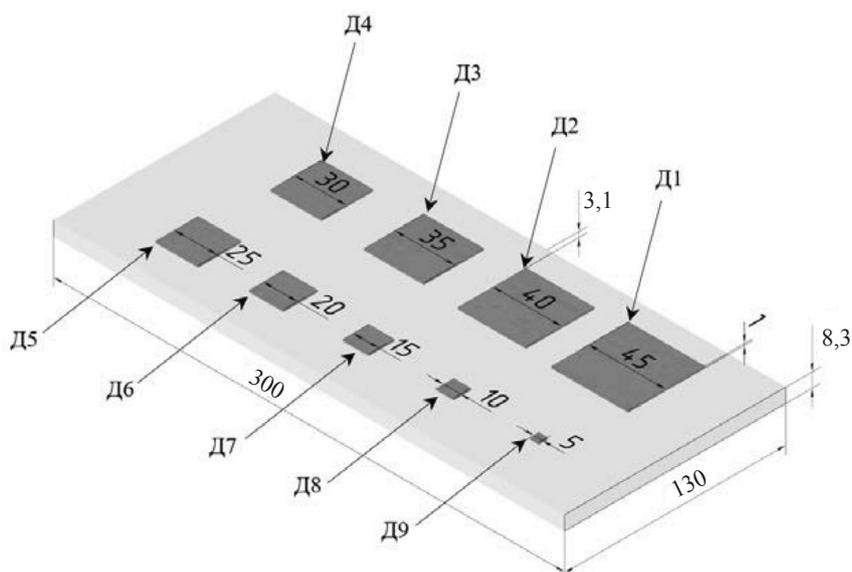


Рис. 2. Схема контрольного образца, состоящего из четырех слоев ПММА, соединенных двухсторонней клейкой лентой, с искусственными дефектами.

В экспериментальных исследованиях контрольный образец нагревали в течение 10 с с использованием двух галогенных ламп общей мощностью 2 кВт, расположенных на фиксированном расстоянии от образца для обеспечения постоянного уровня нагрева. Ввиду различий в объективах, каждый из использованных тепловизоров был установлен на определенном расстоянии от объекта контроля таким образом, чтобы образец полностью входил в поле зрения тепловизора. Резкость теплового изображения в каждом тепловизоре настраивали индивидуально по краю объекта контроля.

Запись и обработку последовательностей термограмм с частотой 1 Гц осуществляли с помощью программы ThermoFit Pro (НИ ТПУ). Для уменьшения количества термограмм, каждая последовательность была усреднена по трем кадрам. При работе с тепловизором ThermApp было использовано доработанное Android-приложение, сохраняющее термограммы в формате, совместимом с программой ThermoFit Pro. В случае тепловизора Testo, не позволяющего производить

потоковую запись термограмм, тепловые изображения записывали непосредственно с экрана тепловизора с помощью видеокамеры при предустановленном диапазоне температур от +25 до +27 °С, что представляло наиболее примитивную процедуру ТК. В обработке данных участвовали первые 100 термограмм каждой последовательности, соответствующих стадии охлаждения контрольного образца.

Выбранная схема одностороннего ТК является типовой с точки зрения расположения средств и объекта контроля, мощности нагрева, а также принятой процедуры обработки данных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 приведены термограммы контрольного образца, полученные с помощью всех использованных тепловизоров на 80-й секунде испытаний, что приблизительно соответствовало опти-

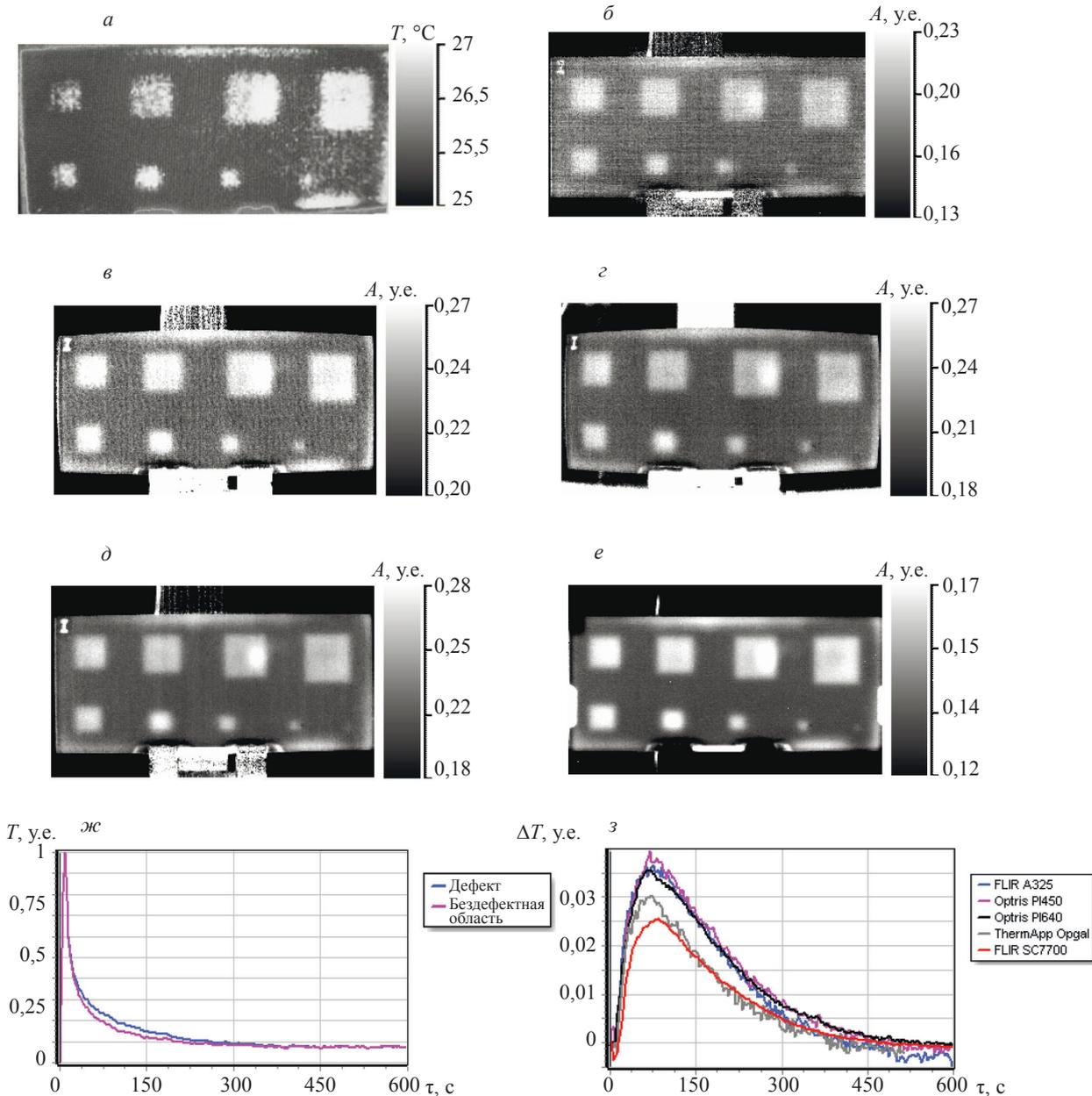


Рис. 3. Результаты ТК контрольного образца:

a — Testo 875; *б* — Opgal ThermApp; *в* — Optris PI450; *г* — Optris PI640; *д* — FLIR A325; *е* — FLIR SC7700; *ж* — профили температуры в дефектной и бездефектной областях (тепловизор FLIR A325); *з* — температурный сигнал от дефекта Д7.

мальному времени наблюдения большинства дефектов на глубине 3,1 мм (см. графики изменения температуры поверхности на рис. 3ж). Ввиду того, что результаты измерений тепловизором FLIR SC7700 были выражены в условных единицах (DL), а последовательности термограмм, полученные остальными тепловизорами, содержали температурные значения, все термограммы были нормированы по амплитуде в диапазоне от 0 до 1 (за исключением термограммы, полученной с помощью тепловизора Testo 875). Температурный диапазон приведенных ниже термограмм для 80-й секунды контроля был подобран индивидуально, чтобы обеспечить визуальное распознавание наибольшего количества дефектов.

Результаты на рис. 3а—е демонстрируют, что большинство дефектов образца уверенно идентифицируются, причем в случае тепловизоров Testo 875, Opgal ThermApp и Optris PI450 это происходит на фоне заметного одинопиксельного шума, а наименее зашумленной является термограмма, полученная с помощью прибора FLIR SC7700, который обладает наилучшей температурной чувствительностью. Фактически, все тепловизоры обеспечили выявление восьми дефектов. Дефект Д9 (нижний ряд справа) размером 5×5 мм лучше всего выявлялся с помощью тепловизора FLIR SC7700, а слабые отметки этого дефекта также наблюдались с помощью обоих приборов Optris и тепловизора FLIR A325. Рис. 3з показывает изменение дифференциальных температурных сигналов ΔT над дефектом Д7 для использованных тепловизоров (кроме тепловизора Testo 875). Максимумы сигналов, имеющие место приблизительно при 80 с, соответствуют оптимальному времени наблюдения. Подтверждено, что наименее зашумленный результат контроля был получен с помощью тепловизора FLIR SC7700 (кривая красного цвета).

На рис. 4 приведены результаты обработки исходных последовательностей термограмм с использованием метода анализа главных компонент (кроме тепловизора Testo 875). В обработке участвовали первые 100 термограмм каждой последовательности, причем наилучшие результаты

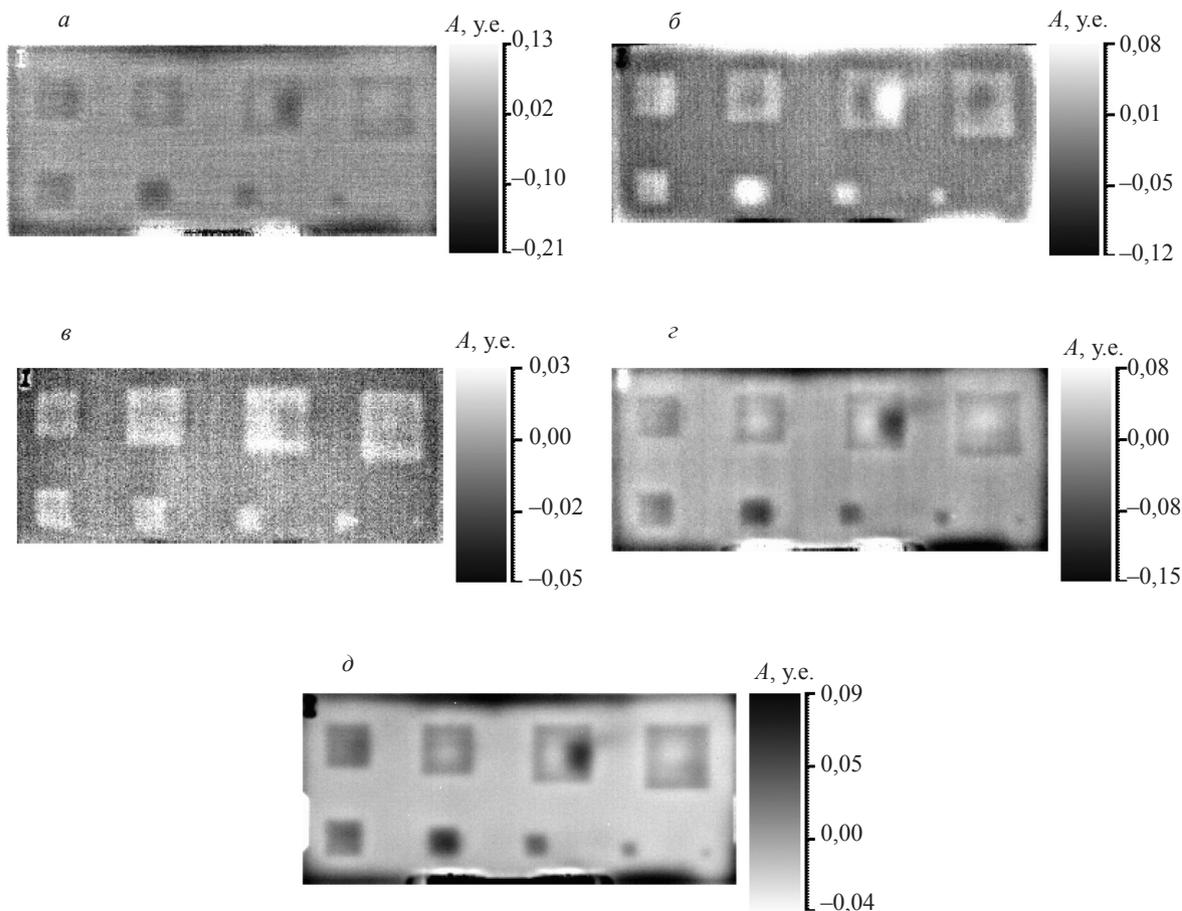


Рис. 4. Результаты обработки результатов ТК контрольного образца с помощью метода анализа главных компонент: а — Opgal ThermApp (2-я компонента); б — Optris PI450 (2-я компонента); в — Optris PI640 (3-я компонента); з — FLIR A325 (2-я компонента); д — FLIR SC7700 (3-я компонента).

были получены в изображениях 2-й и 3-й главных компонент. Статистический метод анализа главных компонент, введенный в ТК N. Rajic [17], реализован в виде опции вышеупомянутой программы ThermoFit Pro и предназначен для выделения наиболее существенных особенностей термограмм. Фактически, в результате применения данного метода последовательность любой длины заменяют набором из 3-5 изображений главных компонент, содержащих картину неравномерного нагрева, а также дефектные отметки.

Обработка данных методом анализа главных компонент улучшила визуальное распознавание дефектов (см. рис. 4). Например, дефект Д9 уверенно распознавался на термограммах, полученных с помощью тепловизоров FLIR A325 и FLIR SC7700. Данный вид обработки также улучшил результаты, полученные на обоих тепловизорах Optiris. В частности, дефект Д9 при определенном опыте оператора, а также благодаря регулярности расположения дефектов, визуально распознавался при использовании обеих ИК камер PI450 и PI640. Границы дефектов на изображении 3-й главной компоненты (тепловизор PI640) являются более резкими по сравнению с изображениями на тепловизоре PI450 благодаря ИК матрице большего размера.

Кроме визуальной оценки дефектов было проведено сравнение величин отношения сигнал/шум (*SNR*) для дефекта Д7 с поперечными размерами 15×15 мм (за исключением прибора Testo 875) (см. табл. 2).

Таблица 2

Величины отношения сигнал/шум для дефекта Д7

Отношение сигнал/шум (<i>SNR</i>)				
Opgal ThermApp	Optiris PI450	Optiris PI640	FLIR A325	FLIR SC7700
3,6	5,3	6,7	14,2	16,2

Из табл. 2 видно, что величины *SNR* возрастают в соответствии с улучшением технических характеристик (ростом цены) тепловизоров. Например, в случае тепловизора FLIR SC7700 величина *SNR* более чем в четыре раза превышает *SNR* для тепловизора Opgal ThermApp. В свою очередь, тепловизоры Optiris PI450 и PI640 обеспечивают *SNR* в 3 раза ниже, чем в случае тепловизоров FLIR A325 и FLIR SC7700. Данный факт связан с тем, что, по определению, величины *SNR* существенно определяются однопиксельным шумом, который, в свою очередь, связан с температурным разрешением тепловизора. В то же время этот фактор может быть несущественным при выявлении дефектных зон, включающих большое количество пикселей.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Количественная оценка качества визуального распознавания дефектов была выполнена девятью операторами-термографистами, которым были предъявлены термограммы рис. 3а—е и 4а—д. Операторы визуально оценивали количество обнаруживаемых дефектов на основе априорных сведений о структуре контрольного образца (см. табл. 3). Такой подход позволил исключить из анализа обнаруженные операторами естественные дефекты контрольного образца (расслоения по периметру изделия). Иными словами, оценивали эффективность обнаружения известных искусственных дефектов в контрольном образце.

Как следует из табл. 3, при анализе исходных ИК-термограмм (рис. 3) все лабораторные и исследовательский тепловизоры продемонстрировали среднее количество выявленных дефектов более 8, в то время как для инспекционных тепловизоров Testo 875 и ThermApp среднее число идентифицированных дефектов составило соответственно 7,8 и 7,9. После применения алгоритмов обработки данных среднее количество выявленных дефектов с использованием инспекционного тепловизора ThermApp достигло 8. В целом, среднее количество дефектов, выявленных с помощью лабораторных и исследовательских тепловизоров, распределилось в соответствии с их техническими характеристиками (стоимостью).

Таблица 3

Эффективность выявления искусственных дефектов в контрольном образце операторами-термографистами

Номер рисунка — модель тепловизора	Оператор									Среднее количество выявленных дефектов
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Термограммы рис. 3										
<i>a</i> — Testo 875	8	8	8	7	8	8	7	8	8	7,8
<i>б</i> — ThermApp	8	8	8	8	8	8	7	8	8	7,9
<i>в</i> — PI450	8	8	9	8	8	8	8	9	9	8,3
<i>г</i> — PI640	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<i>д</i> — A325	8	8	9	8	8	8	8	9	9	8,3
<i>е</i> — SC7700	9	8	9	8	8	8	8	9	9	8,4
Термограммы рис. 4										
<i>a</i> — ThermApp	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<i>б</i> — PI450	8	8	8	8	9	8	8	9	9	8,3
<i>в</i> — PI640	9	9	9	8	9	8	7	9	9	8,6
<i>г</i> — A325	8	9	9	9	9	9	7	9	9	8,7
<i>д</i> — SC7700	8	9	9	9	9	9	8	9	9	8,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предположении, что задачи ТК дефектов в композиционных материалах с поперечными размерами 5—10 мм на глубинах до нескольких миллиметров существенно отличаются от задач научных исследований, где требуется максимально высокое температурное и пространственное разрешение, был выполнен анализ эффективности тепловизоров различного технического уровня и, соответственно, различного ценового сегмента. Девять операторов-термографистов анализировали результаты ТК контрольного образца из ПММА с девятью хорошо воспроизводимыми дефектами различного размера. Установлено, что технические характеристики тепловизора определяют визуальное восприятие термограмм, в частности, связанное с наличием однопиксельного шума, однако мало сказываются на эффективности обнаружения дефектов. Фактически, все тепловизоры обеспечили обнаружение восьми из девяти дефектов контрольного образца, причем не был выявлен дефект размером 5×5 мм (все дефекты были расположены на глубине 3,1 мм и имели толщину 1 мм). Обработка результатов контроля с помощью известных алгоритмов, например, метода анализа главных компонент и преобразования Фурье, улучшает визуальное восприятие термограмм и в ряде случаев улучшает выявляемость дефектов. В целом, приемлемые результаты ТК возможны при использовании тепловизоров и тепловизионных модулей бюджетного сегмента. Будущие исследования предполагают распространить анализ эффективности применения тепловизионных систем различного уровня для ТК дефектов, соответствующих пределу обнаружения по размерам, толщине и глубине залегания.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang Z., Richardson M., Nondestructive Testing of Composite Materials // Handbook of Multiphase Polymer Systems. 2011. V. 1. P. 777—796.
2. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Klodov D.Yu., Yurkin V.A. Thermal nondestructive testing of composite and metal parts manufactured by additive technologies // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 11. P. 1035—1040.
3. Georges M., Srajbr C., Menner P., Koch J., Dillenz A. Thermography and Shearography Inspection of Composite Hybrid Sandwich Structure Made of CFRP and GFRP Core and Titanium Skins // Multidisciplinary Digital Publ. Instit. Proc. 2018. V. 2. No. 8. P. 484. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05384>

4. *Shrestha R., 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. V. 18. No. 2. P. 1—16.
5. *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 / Non-metal Sandwich Structures by Thermal NDT, and a Comparison of Areal Heating and Scanned Linear Heating by Optical and Inductive Methods // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 40. No. 2. P. 44. DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y
6. *Yi Q., Tian G.Y., Malekmohammadi H., Zhu J., Laureti S., Ricci M.* New features for delamination depth evaluation in carbon fiber reinforced plastic materials using eddy current pulse-compression thermography // *NDT&E Int.* 2019. V. 102. P. 264—273.
7. *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
8. *Becala Г.Т., Гали В.С., Виджая Лакими А., Найк Р.Б.* Сочетание вручную постоенных признаков и признаков глубоких сетей для автоматического обнаружения дефектов в процессе визуализации квадратичной частотно-модулированной тепловой волны // *Дефектоскопия*. 2021. № 6. С. 46—56.
9. *Дубинский С.В., Казьмин Е.А., Ковалев И.Е., Корнилов А.Б., Корнилов Г.А., Костенко В.М., Чернявский А.А.* Развитие вибротермографии как метода неразрушающего контроля изделий из полимерных конструкционных материалов с использованием принудительных механических вибраций // *Дефектоскопия*. 2021. № 6. С. 35—45.
10. *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
11. Представительство компании Testo в России, ООО ГК «ИМПЕРИЯ ИНСТРУМЕНТА»: официальный сайт. URL: <https://testoshop.ru/professionalnyj-teplovizor-s-superresolution-testo-875-1i> (дата обращения: 05.05.2023). Текст: электронный.
12. Thermal cameras for android & linux/Opgal Optronic Industries Ltd. Текст: электронный // Opgal Optronic Industries Ltd. официальный сайт URL: <https://www.opgal.com/wp-content/uploads/2016/04/Therm-App-Brochure-2021.pdf> (дата обращения: 05.05.2023).
13. Optris PI 450i — технические характеристики. Текст: электронный // Optris GmbH Официальный сайт. URL: https://www.optris.global/downloads-infrared-cameras?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/Datasheet%20optris%20PI%20450i.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
14. Optris PI 640i — технические характеристики. Текст: электронный // Optris GmbH Официальный сайт. URL: https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-640?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/Datasheet%20optris%20PI%20640i.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
15. FLIR A325 — технические характеристики. Текст: электронный // Официальный сайт Flir systems. URL: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_010/RND_010_US.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
16. FLIR SC7000 Series — технические характеристики/ Текст: электронный // Официальный сайт Flir systems. URL: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_017/RND_017_US.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
17. *Rajic N.* Principal Component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures // *Composite Structures*. Dec. 2002. V. 58. No. 4. P. 521—528. DOI:10.1016/S0263-8223(02)00161-7