

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Корнилов Г.А. Методика ИК-термографии выявления скрытого дефекта в авиационной конструкции из полимерных композиционных материалов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 41–48. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.06

Please cite this article in English as:

Kornilov G.A. The method of infrared thermography for detecting a hidden defect in the aviation structure of polymer composites. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 1, pp. 41-48. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.06

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 1, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.06

УДК 620.179.13

Г.А. Корнилов

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия

**МЕТОДИКА ИК-ТЕРМОГРАФИИ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТОГО ДЕФЕКТА В АВИАЦИОННОЙ
КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассмотрена возможность применения метода ИК-термографии (инфракрасная термография) для выявления скрытого дефекта в авиационной конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Актуальность проблем, рассматриваемых в статье, обусловлена тем, что для выявления скрытого дефекта в основном использовались различные источники теплового нагружения непрерывного действия с последующей поликадровой обработкой термограмм, поскольку большая трудоемкость получения результата и высокие требования к уровню подготовки персонала сдерживали их практическое применение.

Учитывая, что эффективность термографического неразрушающего контроля конструкции зависит от характера теплового воздействия на образец и методики обработки термограмм, в работе комплексно исследовались оба фактора.

Особенностью разработанной методики ИК-термографии выявления скрытого дефекта в композитной конструкции является совместное использование трехимпульсного источника теплового нагружения, позволившего варьировать параметры термического воздействия, и двумерной монокадровой обработки термограмм. В качестве экспериментального образца для отработки методики определения границы дефекта по толщине образца изделий из ПКМ был использован элемент авиационной конструкции с открытыми полостями определенной глубины.

По результатам испытаний был установлен рациональный режим теплового нагружения образца при его облучении и определена эффективная процедура преобразования термограмм для обнаружения дефекта в конструкции, при этом применение разработанной методики осуществимо на операторском уровне.

Работа по содержанию и результатам испытаний имеет особое практическое значение, поскольку позволит применять разработанную методику активного теплового неразрушающего контроля изделий из ПКМ в натуральных условиях.

Ключевые слова: активный тепловой контроль, полимерные композиционные материалы, повреждение, трехимпульсный источник теплового нагружения, монокадровая обработка, температурный сигнал, термограмма, термопрофилограмма, процедура преобразования изображения, сегментация.

G.A. Kornilov

Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky «TsAGI», Zhukovsky, Russian Federation

**THE METHOD OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR DETECTING A HIDDEN DEFECT
IN THE AVIATION STRUCTURE OF POLYMER COMPOSITES**

The possibility of using the method of infrared thermography for detecting a hidden defect in an aircraft structure made of polymer composite materials (PCM) is considered. The relevance of the problems discussed in the article is due to the fact that various sources of continuous thermal loading with subsequent poly-frame processing of the thermograms were mainly used to identify a hidden defect, since the high labor intensity of obtaining the result and high requirements to the level of personnel training constrained their practical application.

Given that the effectiveness of thermographic nondestructive testing of a structure depends on the nature of the thermal effect on the sample and the procedure for processing thermograms, both factors were comprehensively investigated in this work.

The peculiarity of the developed technique of infrared thermography to detect a hidden defect in a composite structure is the combined use of a three-pulse source of thermal loading, which made it possible to vary the parameters of thermal influence, and two-dimensional mono-frame processing of thermograms. An element of an aircraft structure with open cavities of a certain depth was used as an experimental sample for testing the method for determining the defect boundary by the thickness of a sample of PCM products.

Based on the test results, a rational mode of thermal loading of the sample during its irradiation was established and an effective procedure for converting thermograms to detect a defect in the structure was determined, while the application of the developed technique is feasible at the operator level.

The work, in terms of its content and test results, is of great practical importance, since it will make it possible to apply the developed method of active thermal nondestructive testing of PCM products under natural conditions.

Keywords: active thermal testing, polymer composites, defect, three-pulse source of thermal loading, monoframe processing, temperature signal, thermogram, thermal profile, image conversion procedure, segmentation.

Введение

Определение скрытых дефектов в изделиях из ПКМ при проведении неразрушающего контроля имеет особое практическое значение. Применение методов термографии для решения данной задачи не получило широкого распространения. Основная причина сложившейся ситуации заключалась в том, что при разработке указанных методов была ориентация на использование источника теплового нагружения непрерывного действия с постоянным, гармоническим и моноимпульсным тепловым потоком облучения образца и последующей поликадровой обработки термограмм [1–8]. Так, в работе [1] приведены примеры аналитического определения глубин залегания дефектов в случае теплового нагружения образцов материалов в виде гармонического и моноимпульсного теплового потока с использованием многомерных моделей и решением задач теории теплопроводности.

В связи с этим целью настоящей работы являлось формирование рационального режима теплового нагружения образца при его облучении и обоснование процедуры обработки термограммы применительно к задаче определения положения дефекта образца из ПКМ с тем, чтобы повысить эффективность и возможность практического применения разрабатываемой методики за счет снижения времени на получение результатов.

Предмет и средства исследований

Экспериментальный образец для определения границы дефекта по толщине образца изделий из ПКМ базировался на модели с «глухими» отверстиями,

представляющей конструкцию с открытыми полостями определенных глубин и сечений с тыльной стороны. Поэтому граница дефекта по толщине в испытаниях определялась как разница между толщиной конструкции и глубиной наиболее удаленного от поверхности обнаруживаемого отверстия.

Для испытаний использовался фрагмент авиационной конструкции из ПКМ в виде прямоугольной пластины со стрингерами размером 310×130 мм и толщиной 3 мм, в котором был выфрезерован ряд глухих отверстий с квадратным сечением со стороной $l = 8$ мм и круглого сечения с диаметром $d = 8$ мм, причем с тремя разными высотами внутренней стенки {0,5; 1,5; 2,5} мм (рис. 1). Следует отметить, что данный экспериментальный образец согласно работе [9] относится к конструктивно-подобным образцам материалов, а не к образцу «чистого» материала, поэтому результаты исследования будут иметь важное научно-практическое значение.

При испытаниях рассматривался односторонний подход активного теплового неразрушающего контроля (АТНК), поскольку в рамках двухстороннего подхода процедура определения границы дефекта по толщине хотя упрощается, но практически неприменима в условиях эксплуатации летательных аппаратов (ЛА).

Эффективность АТНК зависит, как известно, от двух основных факторов. Первый связан с источником теплового нагружения (ИТН), а именно с его параметрами, особенностями облучения и режимом работы; второй – с функциональными возможностями программы преобразования термограмм.

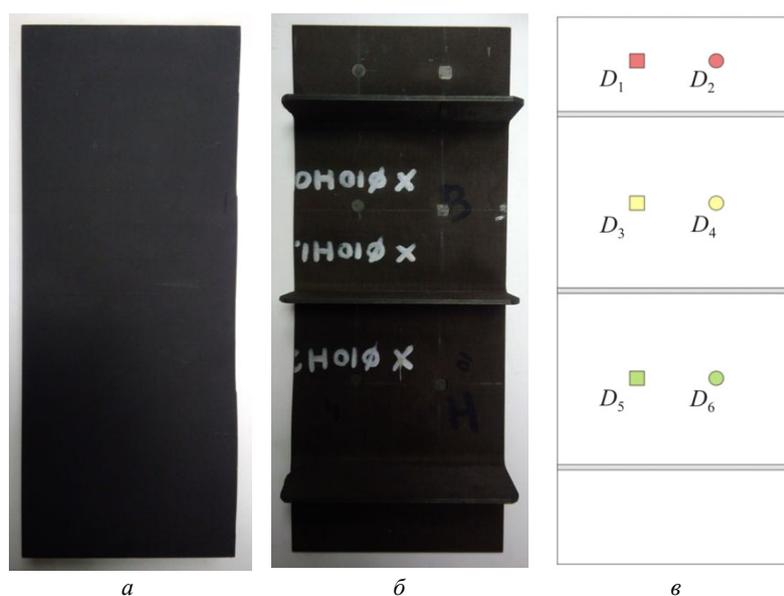


Рис. 1. Фото образца: *а* – с лицевой стороны; *б* – с тыльной стороны; *в* – схема расположения «глухих» отверстий: высота полости: красный – 0,5 мм, желтый – 1,5 мм, зеленый – 2,5 мм

При выборе ИТН было учтено, что обнаружение дефектов зависит не только от величины подводимой энергии к образцу, но и способа ее подвода и длительности воздействия, при которых в момент съемки тепловизором поле яркости в области дефекта не должно полностью нивелироваться с полями яркости неповрежденной области образца. В качестве ИТН был выбран источник трехимпульсного действия с возможностью формирования режима его работы изменением величины энергии, количества импульсов и интервала между ними.

Для этого в работе использовалась установка фирмы Hensel, состоящая из импульсного генератора питания и лампы-вспышки с диффузно-зеркальным рефлектором. Генератор накопления энергии представляет собой конденсаторы с применением высоких напряжений, подзарядка которых осуществляется за определенное время исходя из его технических характеристик [10]. Импульс имеет характер функции Дирака с продолжительностью от 1/800 до 1/440 с в зависимости от энергии облучения.

Источником излучения в лампе-вспышке является кратковременный высоковольтный электрический разряд в кварцевой лампе, имеющей тороидальную форму. Максимум излучения лампы приходится на ультрафиолетовый и видимый диапазоны длин волн, при этом в среднем и дальнем ИК-поддиапазонах излучение существенно уменьшается, что позволяет обеспечить спектральную селекцию в режимах работы ИТН и тепловизора.

В конструкции установки предусмотрено подключение ламп, как одной, так и двух одновременно. Для их работы в установке существуют три разъема, один из них основной, пропускающий до 100 % энергии, и два дополнительных – до 50 %. При использовании одной лампы в основном разъеме обеспечивается 10 режимов облучения образца. В то же время для работы двух ламп использование разъемов возможно в двух вариантах. Первый – через основной и дополнительный разъемы по 3 кДж каждый, а второй – через два дополнительных по 1,5 кДж каждый. При этом обеспечивается три режима облучения образца. В работе ограничили одноламповым вариантом облучения с тремя максимальными режимами.

Методы обработки термограмм могут базироваться как на поликадровом, так и монокадровом подходах. Поликадровый подход для задачи опреде-

ления толщинных границ дефекта рассматривался ранее, поэтому представляет интерес исследование возможностей монокадрового подхода, поскольку на его основе можно будет создать достаточно простые и производительные технологии обнаружения дефектов.

Монокадровая обработка термограммы может быть одномерной в виде термопрофилограмм, двумерной – на основе анализа термоизображения, и их комбинация. Одномерная обработка получила широкое развитие, поскольку для раннего программного обеспечения тепловизоров характерны статистика и графопостроение [11]. Двумерная обработка основана на анализе гистограмм изображения, так как данные с тепловизора поступают в 14-битном формате с диапазоном [0÷16 383], а визуализация изображения осуществляется – в 8-битном с диапазоном [0÷255]. В связи с этим преобразование диапазонов возможно как линейное, так и нелинейное [12].

Вариант с линейной зависимостью преобразования термограмм приводит к потере детализации термокартины, что затрудняет обнаружение дефектов.

В работе использовались стандартная с нелинейным преобразованием *Plateau Equalization (PE)* [12–14] – выравнивающая плато в высоком динамическом диапазоне гистограммы [15–20], а также дополнительные процедуры преобразования:

– *Advanced Plateau Equalization (APE)* – процедура, в которой доминирующему диапазону температур соответствует большая контрастность, а не доминирующему – меньшая;

– *Digital Detail Enhancement (DDE)* – процедура, которая позволяет отображать детали в высоком динамическом диапазоне. В процедуре существует семь вариантов детализации изображения. В работе использовался вариант с параметром, равным пяти [8].

При визуализации результатов обработки термограмм использовалась монохромная палитра *sepia*, нормализованная к 8-битной шкале [8].

Таким образом, рассмотрен предмет и средства экспериментальных исследований по формированию режимов облучения образца трехимпульсным ИТН и особенностям численной обработки тепловизионных данных на основе монокадрового подхода, комплексная разработка которых направлена на решение задачи определения границы дефекта по толщине образца изделий из ПКМ.

Варианты трехимпульсного теплового нагружения

Варианты теплового нагружения	Энергия импульса, кДж	Межимпульсный интервал Δt , с	Минимальный межимпульсный интервал подзарядки генератора Δt_{\min} с
1	6	4,9	4,3
2	3	3,0	2,3
3	1,5	2,0	1,9

Результаты исследований

Разработке метода решения задачи определения границы дефекта по толщине образца предшествовал анализ обнаружения при одноимпульсном тепловом нагружении с максимальной энергией – 6 кДж. Результаты в виде температурной зависимости и термограммы, полученной с использованием стандартной процедуры преобразования изображения в момент времени $A - 5$ с после нагружения, представлены на рис. 2.

По термограмме можно отчетливо обнаружить «донные» отверстия нижнего ряда, т.е. дефектов, наиболее близко расположенных к лицевой поверхности образца. В то время как среднего – лишь слабые силуэты.

В работе за основу метода облучения образца было взято трехимпульсное тепловое нагружение. При этом минимальный интервал между импульсами практически определялся потребным временем генератора используемой установки для подзарядки до 100 %. Характеристики вариантов облучений приведены в таблице.

Температурные профили соответствующих вариантов трехимпульсного теплового нагружения (варианты $i = \{1, 2, 3\}$) представлены на рис. 3, с нанесенными моментами времени: $A_i - 5$ с после нагружения. Это обусловлено тем, что заметная разница дефектной и бездефектной температур, как известно, начинает сказываться на стадии охлаждения образца.

Термограммы двух оставшихся вариантов трехимпульсного теплового нагружения, полученные через 5 с после прекращения теплового нагружения (рис. 3, точки A_1, A_2) и сформированные с использованием различных процедур преобразования, представлены на рис. 4.

Термограммы вариантов трехимпульсного теплового нагружения со стандартной процедурой позволяют наглядно обнаружить только нижний ряд отверстий, а среднего ряда – лишь очертания.

Анализ представленных температурных профилей трехимпульсного теплового нагружения позволил установить:

- тепловое нагружение в вариантах 1 и 2 повысило температуру образца на ~ 3 °С, а варианте 3 – на $\sim 1,5$ °С;

- время нагружения образца при варианте 1 в сравнении с вариантом 2 дольше в $\sim 1,7$ раза.

В связи с тем что температурный прогрев образца в варианте 3 (1,5 кДж) оказался недостаточным, то в дальнейшем в анализе термограмм этот вариант не рассматривался.

Применение дополнительных процедур преобразования термограмм по-разному повлияло на обна-

ружение отверстий. В случае применения процедуры DDE отчетливо видны дефекты нижнего и среднего рядов, а с процедурой APE – не только нижний и средний ряды отверстий, но и верхний ряд.

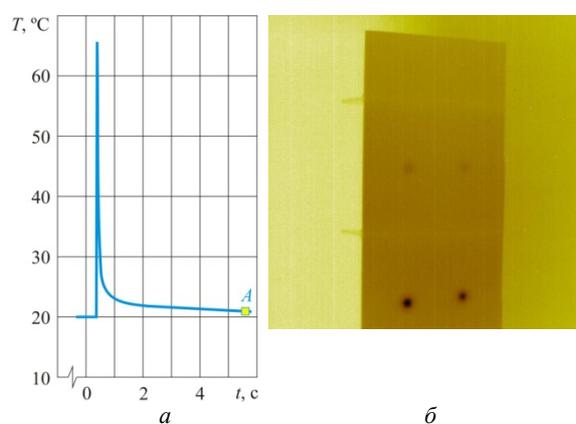


Рис. 2. Одноимпульсное нагружение образца с энергией 6 кДж: а – температурный профиль; б – термограмма со стандартным преобразованием в момент времени A

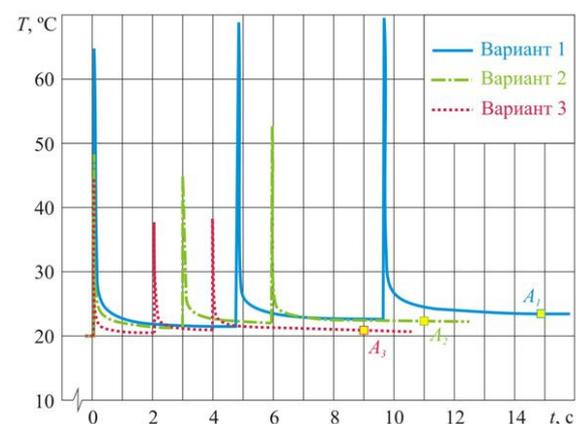


Рис. 3. Температурные профили вариантов трехимпульсного теплового нагружения

Влияние трехимпульсности теплового нагружения с энергией 6 кДж (вариант 1), можно оценить посредством сравнения термограмм трехимпульсного нагружения (рис. 4) и одноимпульсного воздействия (см. рис. 2, б), полученных с использованием стандартной процедурой преобразования термограмм. Сравнение показало, что в случае трехимпульсного нагружения более отчетливо виден средний ряд. Поэтому, несмотря на увеличение длительности процедуры за счет роста количества импульсов, эффективность обнаружения дефекта в этом случае возрастает.

Характерной особенностью процедур является применение преобразования к сегментной области термоизображения (Region of Interest – ROI) [8], позволяющее локализовать исследуемую зону дефекта. При этом в качестве сегмента может быть термограмма как в целом, так и выбранная на ней часть – субтермограмма.

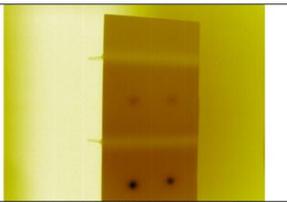
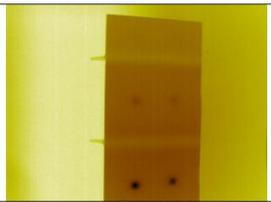
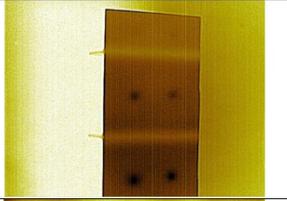
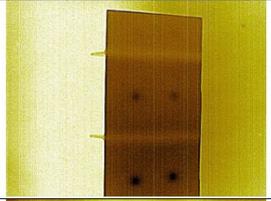
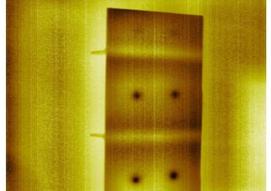
Варианты процедур	Варианты теплового нагружения	
	1	2
PE (стандартная)		
DDE		
APE		

Рис. 4. Преобразованные термограммы после нагружения спустя 5 с

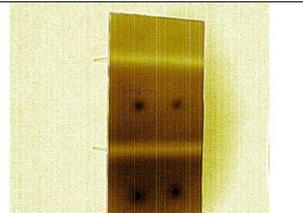
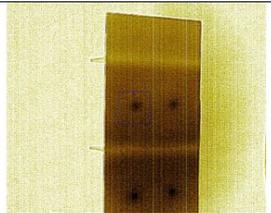
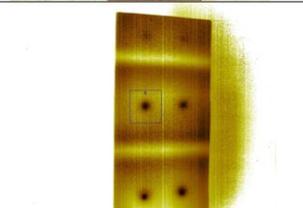
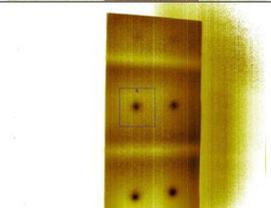
Варианты процедур	Варианты теплового нагружения	
	1	2
DDE к S_1		
APE к S_1		

Рис. 5. Результирующие термограммы с преобразованиями по S_1

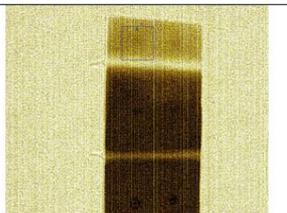
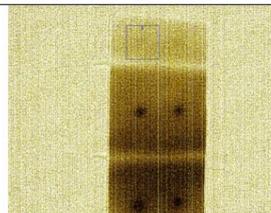
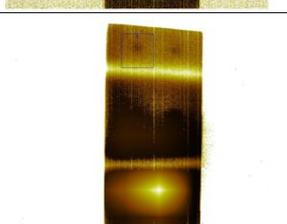
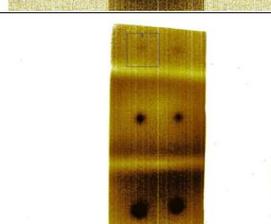
Варианты процедур	Варианты теплового нагружения	
	1	2
DDE к S_2		
APE к S_2		

Рис. 6. Результирующие термограммы с преобразованиями по S_2

Приведенные на рис. 4 результирующие термограммы были получены для термограммы в целом. Поэтому ниже рассмотрим влияние сегментации термоизображения на обнаружение дефектов.

На рис. 5 и 6 приведены результаты процедур преобразования субтермограмм в момент через 5 с после теплового нагружения. Так, в первом случае субтермограмма была выбрана в области дефектов среднего залегания (S_1), а во втором – в области дефектов верхнего ряда, т.е. наиболее удаленных от лицевой поверхности (S_2).

Анализ рис. 5 и 6 показал, что применение процедур при сегментации изображения по-разному влияет на эффективность обнаружения отверстий. Так, в случае сегментации по S_1 процедура DDE не позволяет увидеть верхний ряд; а при использовании APE – полностью виден верхний ряд отверстий, причем на максимальной энергии импульса более наглядно (см. рис. 5).

В то же время при сегментации по S_2 процедура DDE ухудшает обнаруживаемость; при процедуре APE – также виден верхний ряд отверстий, только менее качественно, в случае максимальной энергии импульса, при этом средний и нижний ряды – «в засвете» (рис. 6). Следовательно, выбор субтермограммы влияет на эффективность обнаружения, причем в зависимости от глубины залегания дефекта.

В связи с этим для выявления дефектов на натуральных конструкциях из ПКМ данное обстоятельство обусловило необходимость разработки алгоритма сканирующего поиска при мониторинге реальных конструкций, заключающегося в следующем:

- поиске и обнаружении видимого на термограмме дефекта;
- формировании субтермограммы вокруг найденного дефекта;
- настройка параметров процедуры преобразования;
- получение результирующей термограммы;
- поиск и обнаружение следующего дефекта с большей глубиной залегания, при его отсутствии считается, что предыдущее обнаруженное является дефектом, максимальным по глубине залегания.

В результате комплексного применения ИТН трехимпульсного действия и процедур преобразования термограмм позволило существенно повысить обнаруживаемость отверстий. Достоверность обнаружений подтверждается термопрофилограммами, построенными через отверстия различной глубины (рис. 7).

По характеру зависимостей термопрофилограмм четко выявляется наличие отверстий с раз-

личным залеганием. При этом температурный всплеск с максимальным значением соответствует отверстию с близлежащей внутренней стенкой к поверхности образца. При этом, чем дальше от поверхности залегает дефект, тем графический характер зависимости становится более «расплюснутым», а значения температур уменьшается.

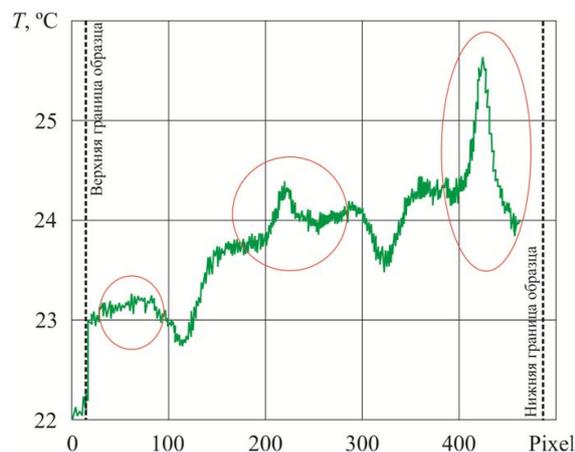


Рис. 7. Термопрофилограмма варианта 1

Выводы

Комплексное применение ИТН трехимпульсного действия с энергиями 6 и 3 кДж и процедуры APE преобразования термограммы позволило существенно расширить возможности обнаружения скрытых дефектов с глубиной залегания ~3 мм конструктивно-подобного образца материала.

Применение в реальных условиях разработанной методики на натуральных конструкциях из ПКМ возможно с ИТН энергией 3 кДж и двумя лампами-вспышками, позволяющими увеличить площадь теплового нагружения и сократить время нагружения в ~1,7 раза. Последующее выявление дефектов произвести алгоритмом сканирующего поиска.

Список литературы

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2013. – 542 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, Ф.С. Смолин, А.В. Ковалев и др.; под ред. В.В. Клюева. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
3. Montanini R., Aliquo S. Nondestructive evaluation of materials using lock-in and pulse phase infrared thermography // XIX IMEKO Congress Fundamental and Applied Metrology (6-11 September, 2009, Lisbon, Portugal). – 6 p.
4. Chapter 2: Fundamentals of Infrared and Thermal Testing: Part 1. Principles of Infrared and Thermal Testing / X.P.V. Maldague, T.S. Jones, H. Kaplan, S. Marinetti, M. Prystay // Nondestructive Handbook, Infrared and Ther-

mal Testing. – Vol. 3, X. Maldague technical ed., P.O. Moore / ed., 3rd edition. – USA, Columbus, Ohio, ASNT Press, 2001. – 718 p.

5. Фоминцева Ю.В., Нестерук Д.А. Реализация метода тепловых волн в тепловом контроле изделий из композитов // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 2 (12). Серия: Инженерные науки. – С. 35–39.

6. Сясько В.А. Возможности применения методов активной термографии для оперативного неразрушающего контроля высокотехнологичных композиционных и металлических изделий в процессе их изготовления и эксплуатации // Сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов» (НККМ-2016), Санкт-Петербург, 7–9 декабря 2016 г. – СПб.: СВЕН, 2016. – С. 132–142.

7. Тепловой контроль авиационных конструкций / А.В. Ковалев, В.И. Матвеев, В.В. Кошкин, С.А. Хижняк // MEGATECH. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2011. – № 2–3. – С. 16–22.

8. Вавилов В.П., Казьмин Е.А. Сравнение методов обработки термоизображений при тепловом неразрушающем контроле // Сборник трудов II Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов КИМИЛА. – 2017. – С. 28–33.

9. Концептуальные аспекты разработки перечня стандартных образцов из полимерных композиционных материалов для развития методологии активного теплового неразрушающего контроля изделий / М.Ч. Зиченков, И.Е. Ковалев, Н.И. Ковалев, Г.А. Корнилов, А.В. Смотров, С.А. Смотрова // Авиационная промышленность. – 2021. – № 1. – С. 100–106.

10. Hensel TRIA 6000 S Generator Power Pack: руководство пользователя. – 2010.

11. ThermaCAM Researcher Pro, Версия 2.10: руководство пользователя. – FLIR SYSTEMS, 2010.

12. Research IR, Версия 4; Руководство пользователя. – FLIR SYSTEMS, 2016.

13. Vickers V.E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery // Opt. Eng. – 1996. – Vol. 35 (7). – P. 1921–1926.

14. Sousa M.J., Moutinho A., Almeida M. Thermal Infrared Sensing for Near Real-Time Data-Driven Fire Detection and Monitoring Systems // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (23). – P. 6803. DOI: 10.3390/s20236803

15. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems / F. Branchitta, M. Diani, G. Corsini, A. Porta // Optical Engineering. – 2008. – Vol. 47 (7). – P. 076401: 1-14.

16. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images / F. Branchitta, M. Diani, G. Corsini, M. Romagnoli // Optical Engineering. – 2009. – Vol. 48 (9). – P. 1–9.

17. A new adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on double plateaus histogram equalization / K. Liang, Y. Ma, Y. Xie, B. Zhou, R. Wang // Infrared Physics and Technology. – 2012. – Vol. 55 (4). – P. 309–315.

18. Multi-characteristic combination based reliability enhancement of optical bidirectional thermal wave radar

imaging for GFRP laminates with subsurface defects / Jinlong Gong, Junyan Liud, Yanting Yu, Yi Zheng // NDT&E International. – 2021. – P. 119.

19. Optimized Contrast Enhancement for Infrared Images Based on Global and Local Histogram Specification / C. Liu, X. Sui, X. Kuang, Y. Liu, G. Gu, Q. Chen // Remote Sens. – 2019. – Vol. 11. – P. 849.

20. Infrared image enhancement algorithm based on adaptive histogram segmentation / J. Huang, Y. Ma, Y. Zhang, F. Fan // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56. – P. 9686–9697.

References

1. Vavilov V.P. Infrakrasnaia termografiia i teplovoi kontrol' [Infrared thermography and thermal monitoring]. Moscow: Spektr, 2013, 542 p.

2. Nerazrushaiushchii kontrol' i diagnostika: spravochnik [Nondestructive testing and diagnostics]. V.V. Kliuev, F.S. Smolin, A.V. Kovalev i dr.; pod red. V.V. Kliueva. 3nd. Moscow: Mashchinostroenie, 2005, 656 p.

3. Montanini R., Aliquo S. Nondestructive evaluation of materials using lock-in and pulse phase infrared thermography. XIX IMEKO Congress Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, Portugal, 2009, 6 p.

4. Maldague X.P.V., Jones T.S., Kaplan H., Marinetti S.M. Prystay Chapter 2: Fundamentals of Infrared and Thermal Testing: Part 1. Principles of Infrared and Thermal Testing. Nondestructive Handbook, Infrared and Thermal Testing. Ed. X. Maldague technical P.O. Moore. 3nd. USA, Columbus, Ohio, ASNT Press, 2001, vol. 3, 718 p.

5. Fomintseva Iu.V., Nesteruk D.A. Realizatsiia metoda teplovykh voln v teplovom kontrole izdelii iz kompozitov [Implementation of the heat wave method in thermal control of composite products]. Vestnik nauki Sibiri. Seriya: Inzhenernye nauki, 2014, no. 2 (12), pp. 35–39.

6. Sias'ko V.A. Vozmozhnosti primeneniia metodov aktivnoi termografii dlia operativnogo nerazrushaiushchego kontrolya vysokotekhnologichnykh kompozitsionnykh i metallicheskiikh izdelii v protsesse ikh izgotovleniia i ekspluatatsii [Possibilities of application of active thermography methods for on-line nondestructive testing of high-tech composite and metal products in the process of their production and operation]. Sbornik trudov 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii «Pribory i metody nerazrushaiushchego kontrolya kachestva izdelii i konstruksii iz kompozitsionnykh i neodnorodnykh materialov» (NKKM-2016). Saint-Petersburg: SVEN, 2016, pp. 132–142.

7. Teplovoi kontrol' aviatsionnykh konstruksii [Thermal control of aircraft structures]. A.V. Kovalev, V.I. Matveev, V.V. Koshkin, S.A. Khizhniak. MEGATECH. Novye tekhnologii v promyshlennoi diagnostike i bezopasnosti, 2011, no. 2-3, pp. 16–22.

8. Vavilov V.P., Kaz'min E.A. Sravnenie metodov obrabotki termoizobrazhenii pri teplovom nerazrushaiushchem kontrole [Comparison of thermal image processing methods for thermal non-destructive testing]. Sbornik trudov II Otrasevoi konferentsii po izmeritel'noi tekhnike i metrologii dlia issledovaniia letatel'nykh apparatov KIMILA, 2017, pp. 28–33.

9. Kontseptual'nye aspekty razrabotki perechnia standartnykh obraztsov iz polimernykh kompozitsionnykh

materialov dlia razvitiia metodologii aktivnogo teplovogo nerazrushaiushchego kontroliia izdelii [Conceptual aspects of developing a list of standard samples from polymer composites for the development of the methodology of active thermal non-destructive testing of products]. M.Ch. Zichenkov, I.E. Kovalev, N.I. Kovalev, G.A. Kornilov, A.V. Smotrov, S.A. Smotrova. *Aviatsionnaia promyshlennost'*, 2021, no. 1, pp. 100–106.

10. Hensel TRIA 6000 S Generator Power Pack; Rukovodstvo pol'zovatel'ia, 2010.

11. ThermaCAM Researcher Pro, Versiia 2.10; Rukovodstvo pol'zovatel'ia. *FLIR SYSTEMS*, 2010.

12. Research IR, Versiia 4; Rukovodstvo pol'zovatel'ia. *FLIR SYSTEMS*, 2016.

13. Vickers V.E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery. *Optical Engineering*, 1996, vol. 35 (7), pp. 1921–1926.

14. Sousa M.J., Moutinho A., Almeida M. Thermal Infrared Sensing for Near Real-Time Data-Driven Fire Detection and Monitoring Systems. *Sensors*, 2020, vol. 20 (23), p. 6803. DOI: 10.3390/s20236803

15. Branchitta F., Diani M., Corsini G., Porta A. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems. *Optical Engineering*, 2008, vol. 47(7), pp. 076401: 1-14.

16. Branchitta F., Diani M., Corsini G., Romagnoli M. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images. *Optical Engineering*, 2009, vol. 48(9), pp. 096401: 1-9.

17. Liang K., Ma Y., Xie Y., Zhou B., Wang R. A new adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on double plateaus histogram equalization. *Infrared Physics and Technology*, 2012, vol. 55(4), pp. 309-315.

18. Jinlong Gong, Junyan Liud, Yanting Yu, Yi Zheng. Multi-characteristic combination based reliability enhancement of optical bidirectional thermal wave radar

imaging for GFRP laminates with subsurface defects. *NDT&E International*, 2021, p. 119.

19. Liu C., Sui X., Kuang X., Liu Y., Gu G., Chen Q. Optimized Contrast Enhancement for Infrared Images Based on Global and Local Histogram Specification. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, p. 849.

20. Huang J., Ma Y., Zhang Y., Fan F. Infrared image enhancement algorithm based on adaptive histogram segmentation. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, pp. 9686–9697.

Поступила: 14.12.2021

Одобрена: 21.02.2022

Принята к публикации: 22.02.2022

Сведения об авторе

Корнилов Глеб Андреевич (Жуковский, Россия) – начальник научно-исследовательской лаборатории Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (Россия, 140180, Жуковский, ул. Жуковского, 1, e-mail: gleb.kornilov@tsagi.ru).

About the author

Gleb A. Kornilov (Zhukovsky, Russian Federation) – head of the research laboratory Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky (1, Zhukovsky str., Zhukovsky, 140180, Russian Federation, e-mail: gleb.kornilov@tsagi.ru).

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-29-13008.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад. 100 %.