

УДК 620.179.13

DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.02

Г.А. Корнилов

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

МЕТОД ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ С МАЛОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Использование теплового неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов при ударных повреждениях является одним из перспективных направлений. В работе представлен подход мобильного мониторинга, обеспечивающий обнаружение повреждений при малых величинах ударного воздействия. Особенностью разработанного метода выявления ударного повреждения является комплексный учет наличия покрытия на поверхности композиционного материала, типа источника теплового нагружения, технического совершенства тепловизора и возможностей программного обеспечения формирования температурного изображения. При постобработке данных тепловизионной съемки в рамках метода использовалась технология монокадровой обработки, включающей совокупность операций: визуализацию данных съемки в монотонной палитре, усиление контраста термоизображения и локализацию области анализа термоизображения со сканирующим поиском.

Ключевые слова: автоматическая регулировка усиления, лакокрасочное покрытие, энергия удара, локализация.

G.A. Kornilov

Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russian Federation

INFRARED THERMOGRAPHY TECHNIQUE FOR DAMAGE DETECTION ON COMPOSITE MATERIALS UNDER LOW-ENERGY IMPACT

The use of thermal non-destructive testing of products made of polymer composite materials for impact damage is one of the promising directions. The paper presents a mobile monitoring approach that provides damage detection at low impact values. A feature of the developed method of impact damage detection is a comprehensive consideration of the presence of a coating on the surface of composite material, the type of a source of thermal loading, the technical excellence of the thermal imager and the capabilities of the temperature imaging software. In the post-processing of thermal imaging data, the method used monoframe-processing technology, which included a set of operations: visualization of imaging data in a monotone palette, contrast enhancement of the thermal image and sub-framing – narrowing the area of analysis of the original thermal image, with a scanning search.

Keywords: automatic gain control, paint coating, impact energy, localization.

В настоящее время за рубежом широко используются мобильные системы мониторинга композитных конструкций на основе метода инфракрасной (ИК) термографии [1–2]. Однако они ориентированы на использование источников непрерывного действия с постоянной нагрузкой, промышленных тепловизоров с невысокой частотой записи полноформатного кадра и созданных по принципу «ноу-хау» программ обработки данных съемки. Имеющиеся публикации применения таких систем касаются ограниченного перечня образцов композитных изделий [3–5], из описаний результатов исследований которых можно понять, что выявление повреждений осуществляется на этапе остывания полимерных композиционных материалов (ПКМ), для которого характерно только собственное излучение, т.е. при отсутствии отраженного образцом излучения источника облучения.

Данные обстоятельства ограничивают возможности комплексов мобильного мониторинга композитных конструкций, поэтому необходимо развитие научно-методического обеспечения, в котором, помимо типа и структуры композиционного материала, учитывался ряд дополни-

тельных факторов: наличие лакокрасочных покрытий (ЛКП) на поверхности образца, разнообразие типов источников теплового нагружения, технический уровень тепловизора и возможности программного обеспечения, а также особенности программы постобработки. Их комплексное рассмотрение позволит выработать условия теплового нагружения и съёмки для оперативного обнаружения повреждений.

Важную роль в методе обнаружения повреждений играет технология постобработки экспериментальных данных тепловизионной съёмки. В настоящее время широкую известность получили технологии, где используются метод преобразования Фурье, метод синхронного детектирования Lock-in [6–8] и т.д., характерной особенностью которых является анализ частотных характеристик. Однако большая трудоемкость вычислительных процессов даже применительно к образцам ПКМ может стать серьезным препятствием для их внедрения в промышленные комплексы мобильного мониторинга композитных конструкций.

В то же время реализация монокадровой обработки данных съёмки позволит создать достаточно простые и производительные технологии для мобильного мониторинга композитных конструкций [9–11], поскольку базируются на возможностях программного обеспечения тепловизора и учете его паспортных характеристик. Так, результаты исследований [12] подтверждают возможность оперативного обнаружения ударных повреждений в изделиях из ПКМ, поскольку для их выявления использовался упрощенный монокадровый анализ на основе программного обеспечения тепловизора FLIR Altair с построением термопрофилограмм в прогнозной области наличия повреждения [13]. В связи с этим дальнейшее развитие технологии монокадровой обработки данных тепловизионной съёмки связано с использованием совокупности процедур повышения информативности термоизображения за счет усиления его детализации.

Для повышения практической значимости разрабатываемого метода эксперименты были проведены на образцах с нормированными ударными воздействиями с малой энергией. Учитывая многообразие возможных вариантов реализации разрабатываемого метода, в качестве показателя его совершенства использовалась минимальная величина энергии ударного воздействия на образец, при которой еще обнаруживается повреждение.

Исходные предпосылки разработки метода

Формирование исходных предпосылок для создания метода осуществлялось при детальном анализе факторов активного теплового неразрушающего контроля (АТНК) материалов и конструкций из них.

Композиционный материал. В качестве образцов для испытаний использовался полимерный композиционный материал – углепластик, который применяется в конструкции киля магистрального самолета. Образцы ПКМ имели толщину 5 мм. В работе рассматривались как исходные образцы ПКМ, так и относящиеся к конструктивно-подобным образцам со штатным лакокрасочным покрытием (ЛКП) [14].

Повреждения с различной величиной энергии ударов в соответствии с [15] были нанесены на партии из четырёх одинаковых образцов прямоугольной формы указанного материала, которые при исследовании располагались вплотную друг к другу (рис. 1). Два верхних образца – это образцы без ЛКП, а два нижних – с ЛКП. При этом в обоих комплектах образцов содержались нормированные повреждения с энергией удара 10, 15 и 25 Дж, совокупность которых при исследовании различными вариантами разрабатываемого метода позволит определять величину энергии ударного воздействия, когда обнаруживается повреждение.

Наличие покрытий. Лакокрасочные покрытия на поверхности ПКМ, являющиеся неотъемлемой частью композитных конструкций, при ударных воздействиях, во-первых, играют роль демфирующего слоя, влияющего на размеры повреждения, что подтверждается отсутствием трещин на исследуемом образце с ЛКП в области ударного воздействия с энергией удара 10 Дж, и, во-вторых, влияют на результирующую картину поля яркости ИК-излучения образца

при его облучении, причем в зависимости от поддиапазона длин волн, поскольку их оптические свойства, как правило, не совпадают с таковыми композиционных материалов. При этом для современных лакокрасочных покрытий характерно преобладание излучательных свойств в дальнем ИК-поддиапазоне и отражательных свойств в среднем (рис. 2), а у углепластика они имеют обратную зависимость.

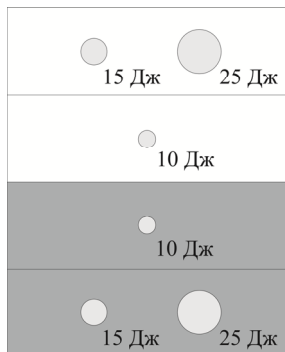


Рис. 1. Расположение образцов материалов без и с ЛКП при испытаниях с указанием повреждений и энергии ударного воздействия



Рис. 2. Нормированный спектральный коэффициент отражения лакокрасочного покрытия

В связи с этим представляет интерес проведение тепловизионных съемок не после облучения источником теплового нагружения (ИТН), а в момент его действия, когда образец будет иметь как собственное, так и отраженное излучение облучателя (рис. 3). Это связано с тем, что отраженное излучение может существенно превосходить собственное, поскольку оно определяется яркостью излучения облучателя и отражательными свойствами образца. К тому же на характер и величину отраженного излучения также влияет и геометрия поверхности повреждения.

Следовательно, при разработке метода обнаружения ударных повреждений в конструкциях из ПКМ в рамках АТНК необходимо учитывать соотношение спектрально-оптических свойств покрытий и ПКМ в рабочем поддиапазоне тепловизора, в котором осуществляется тепловизионная съемка, а также характер теплового нагружения, зависящего от типа ИТН, и момент постобработки данных тепловизионной съемки.

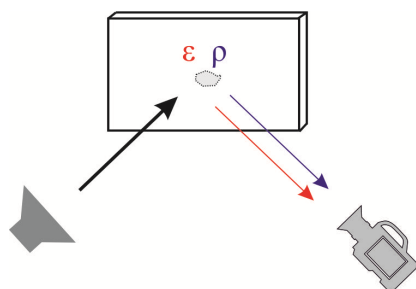


Рис. 3. Схема излучения образца материала при его облучении

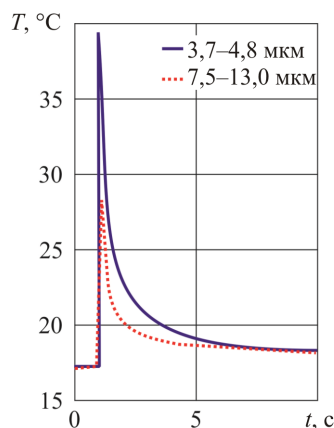


Рис. 4. Динамика изменения яркостной температуры исследуемой области образца при измерениях тепловизорами с различными рабочим спектрами

Источник теплового нагружения. Выбор типа источника теплового нагружения определяет характер излучения образца ПКМ при его облучении, поэтому для исследований были использованы два типа ИТН. Один в виде импульсной лампы-вспышки с рефлектором, другой – контактного средства теплового нагружения («тёплое одеяло»). Это обусловлено тем, что при использовании первого типа ИТН в условиях темного помещения лаборатории можно обеспечить как отраженное излучение источника облучения при его действии, поскольку образец не успевает прогреться, так и собственное после окончания облучения на стадии охлаждения образца, а в случае второго типа ИТН – только собственное излучение, причем после его снятия с образца.

В качестве импульсного источника теплового нагружения использовалась установка фирмы Hensel [16], состоящая из импульсного генератора питания и лампы-вспышки с диффузно-зеркальным рефлектором. Импульс с энергией 6 кДж имел характер функции Дирака с продолжительностью 1/440 с. ИТН типа «тёплое одеяло» представлял собой плоский силиконовый промышленный нагреватель размером 400 × 400 мм² без применения самоклеящегося слоя.

Технический уровень тепловизора. Для тепловизионной съемки в работе использовались тепловизоры фирмы FLIR с различными рабочими спектрами длин волн. При этом тепловизор с рабочим спектром в среднем ИК-поддиапазоне имел матрицу с большим размером и более чувствительный приемник излучения, чем промышленный тепловизор с рабочим спектром в дальнем ИК-поддиапазоне. Данные обстоятельства привели к тому, что при облучении образца ПКМ импульсным ИТН зависимости изменения яркостной температуры, зарегистрированные тепловизорами с различными рабочими спектрами и одинаковыми частотами съемки, отличаются (рис. 4). Также результаты испытаний показали, что тепловизор с рабочим спектром в дальнем ИК-поддиапазоне термограмм к тому же уступает тепловизору с рабочим спектром в среднем ИК-поддиапазоне по информативности.

В связи с этим в работе для обнаружения последствий на образцах ПКМ ударных воздействий с малой энергией приоритетным направлением стало использование тепловизора с рабочим спектром в среднем ИК-поддиапазоне. Принятию этого решения также способствовала возможность обнаружения повреждения с учетом особенностей спектрально-отражательных свойств ЛКП и ПКМ в этом поддиапазоне.

Программное обеспечение тепловизора. Технический уровень тепловизора обуславливает потенциал его программного обеспечения, который предопределяет возможности монокадровой обработки съемки. Различают два направления. Первое связано с использованием технологий анализа термограммы и построения термопрофилограмм за счет применения возможностей программного обеспечения тепловизора, являющегося для каждого индивидуальным [13, 17, 20]. Примером применения данного подхода может служить работа [12], где с использованием программного обеспечения [13] получен ряд интересных результатов теплового разрушающего контроля конструктивно-подобных изделий из ПКМ.

Однако необходимость предварительного визуального осмотра оператором термограммы при формировании «подозрительных» участков для последующего построения термопрофилограмм обуславливает определенный уровень информативности изображения, который в случае применения штатного программного обеспечения тепловизора не всегда высок.

В связи с этим требуется новый подход, который бы улучшал информативность исходного изображения исследуемого образца. Поэтому второе направление монокадровой обработки связано с анализом термограмм, полученных на основе применения специальных процедур обработки изображений, совместимых с программным обеспечением тепловизора.

Технология обработки данных тепловизионной съемки

Программа обработки термограмм с точки зрения оперативности обнаружения повреждений должна базироваться на технологии монокадровой обработки данных съемки [6, 19]. В связи с тем что сама технология инвариантна к выбору кадра, вопросы, связанные с этим,

в работе не рассматриваются. Постобработка соответствующего кадра тепловизионной съемки включает:

- выявление «подозрительных» областей на поверхности образца;
- построение термопрофилограмм с учетом их формы и анализ температурных зависимостей в каждой из данных областей.

Различают упрощенный и развернутый варианты технологии обработки, принципиальное отличие которых заключается в том, что при упрощенной технологии обработки термограмму получают за счет программного обеспечения (ПО) тепловизора при вариации цветовых палитр, а при развернутой – применяются термограммы, полученные в результате совокупности операций по повышению информативности изображения. В то же время характерное для обоих вариантов технологии обработки графопостроение температурных зависимостей в выявленных областях поверхности объекта является опцией ПО тепловизоров [14, 16, 17].

Возможность улучшения информативности изображения при развернутой технологии обработки результатов тепловизионной съемки обусловлена тем, что термограмму можно рассматривать или как числовую матрицу величин температур, или как сформированное изображение. В связи с этим распространены два подхода при ее реализации. В первом производятся алгебраические операции с матрицей, а во втором используются процедуры повышения информативности термоизображений.

Частным случаем первого подхода является так называемое вычитание «начального кадра» – матрицы температур до теплового нагружения. В итоге температурный диапазон существенно сокращается, что может привести к росту информативности изображения и, следовательно, появлению возможности для оператора визуально обнаружить повреждения. Недостатком подхода является то, что участки малых повреждений без трещин, в силу их слабого собственного излучения, на термограмме сливаются с бездефектной зоной образца. По-видимому, данный подход, связанный с простой математической обработкой изображения, необходимо развивать в методах ИК-термографии, но с обоснованием соответствующего функционального аппарата.

Второй подход развернутой монокадровой обработки основан на анализе плотности распределения температурного поля и выделении температурного диапазона с наибольшей плотностью, что позволяет обрабатывать изображения с использованием положений теории обработки изображений [6, 18, 19].

Разработанный вариант развернутой технологии монокадровой обработки включает следующие операции:

- визуализация данных съемки в монотонной палитре;
- усиление контраста термоизображения;
- локализация области анализа термоизображения.

Рассмотрим назначение и роль каждой операции в технологии обработки данных тепловизионной съемки для обнаружения повреждений.

Цветовая палитра. Тепловые изображения, по сути, являются псевдоцветовыми, т.е. связь палитры цветов с температурой задается из соответствия их значениям визуализируемой матрицы. Выбор определенной палитры необходим для облегчения интерпретации оператором изображений в части наличия повреждения. Хотя согласно [6] не следует преувеличивать значением палитры для повышения достоверности обнаружения повреждений, но в сочетании с другими операциями выбор палитры может повысить эффективность технологии обработки данных съемки.

При визуализации термограмм могут использоваться различные цветовые палитры либо монотонные, яркость цвета которых пропорциональна величине температуры. Данному качеству соответствуют палитры с оттенками либо серого цвета, либо коричневого (сепии (sepia)) [18]. Проведенные исследования показали, что для визуального обнаружения повреждений наиболее пригодна сепия, хотя первые исследования проводились с оттенками серого цвета.

Формирование термоизображения в соответствии с процедурой усиления контраста.

В рамках данной операции изменяется соотношение элементов матрицы значений температур к выбранной палитре. Алгоритмы процедур усиления контраста основываются на анализе гистограммы термоизображения и преобразовании его в шкалу псевдоцветов. Следует отметить, что в ПО ResearchIR для этого предусмотрены четыре процедуры усиления контраста.

Использование одной из них – Linear, которая представляет простое линейное преобразование с равномерным распределением шкалы, применительно к мониторингу конструкций из ПКМ затруднительно, поскольку она может применяться только при идеальных условиях создания термоизображения, включая равномерность нагрева поверхности и отсутствие посторонних предметов и явлений при облучении образца ИТН.

Вторая процедура – Plateau Equalization (PE) – является нелинейным преобразованием с уменьшением температурного диапазона за счет сокращения областей минимальных и максимальных значений, используется в качестве стандартной процедуры построения термограммы и применена в упрощенной технологии обработки.

В работе, наряду со стандартной процедурой Plateau Equalization (PE), рассматривались также две другие процедуры:

– Advanced Plateau Equalization (APE) – процедура, выравнивающая гистограмму в диапазоне температур с максимальным количеством пикселей;

– Digital Detail Enhancement (DDE) – процедура, основанная на усовершенствованном нелинейном алгоритме обработки изображений, который сохраняет имеющиеся детали в термоизображениях в диапазонах температур с максимальными количествами пикселей выше порогового значения.

На рис. 5 дана гистограмма, иллюстрирующая распределение количества пикселей в зависимости от активного диапазона температур для различных процедур обработки. Так, для PE соответствует широкий диапазон, в который, помимо пиков, попадают побочные температуры; для APE – диапазон, приходящий на пик максимального количества пикселей. В то же время для DDE – диапазоны с пиками выше порогового количества пикселей.

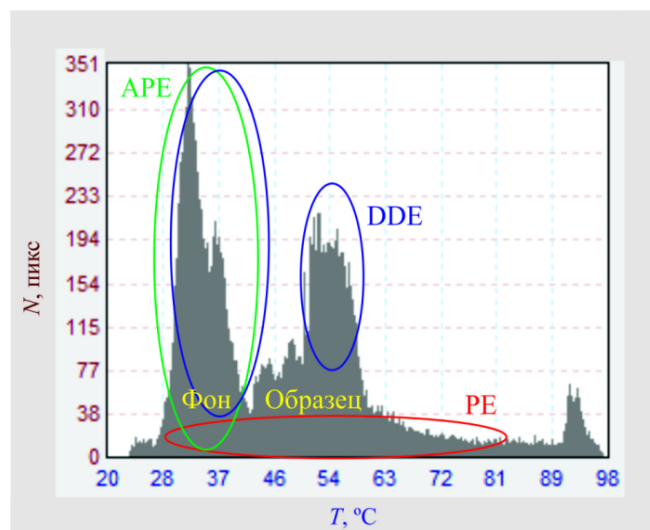


Рис. 5. Гистограмма распределения количества пикселей в зависимости от активного диапазона температур для различных процедур

В результате применения PE выравнивание гистограммы происходит в активном диапазоне температур, который охватывает практически весь диапазон, что приводит к низкой контрастности изображений повреждений на образце. APE, активный диапазон которого приходится на фон, приводит к улучшенной детализации элементов фона. В случае DDE активный

диапазон приходится как на фон, так и на образец, что повышает контрастность поврежденного образца.

Построение термоизображения позволяет исследовать образец на предмет наличия «тёмных пятен». При необходимости параллельно проводится построение термопрофилограмм, информация которых может стать дополнительным фактором присутствия подтверждений.

Локализация – это способ выделения приоритетного участка (субтермограммы) для дальнейшего анализа. Хотя существует множество способов задания её формы, в работе использовалась прямоугольная, элементы которой полностью определены значениями температур. Особенностью субкадрирования является то обстоятельство, что даже малое смещение координат расположения участка при той же форме изменяет результирующее термоизображение, тем самым позволяя обнаружить дефектную область с меньшими размерами.

В связи с изложенным выше в технологии для выявления повреждений с малыми размерами организован итерационный процесс обработки изображения со смещением исследуемой области, который был реализован за счет сканирующего поиска термограммы с повышенной информативностью.

Алгоритм поиска включает (рис. 6):

- выбор и настройку параметров процедуры повышения контраста;
- поиск и обнаружение повреждения на термограмме кадра;
- определение субтермограммы вокруг найденного повреждения;
- трансформацию термограммы по характеристикам субтермограммы;
- поиск и обнаружение повреждения с меньшим ударным воздействием, при его отсутствии считается, что предыдущее обнаруженное является повреждением с минимальным ударным воздействием.

Представленная технология обработки данных тепловизионной съемки в полной мере удовлетворяет мобильному мониторингу конструкций из ПКМ.

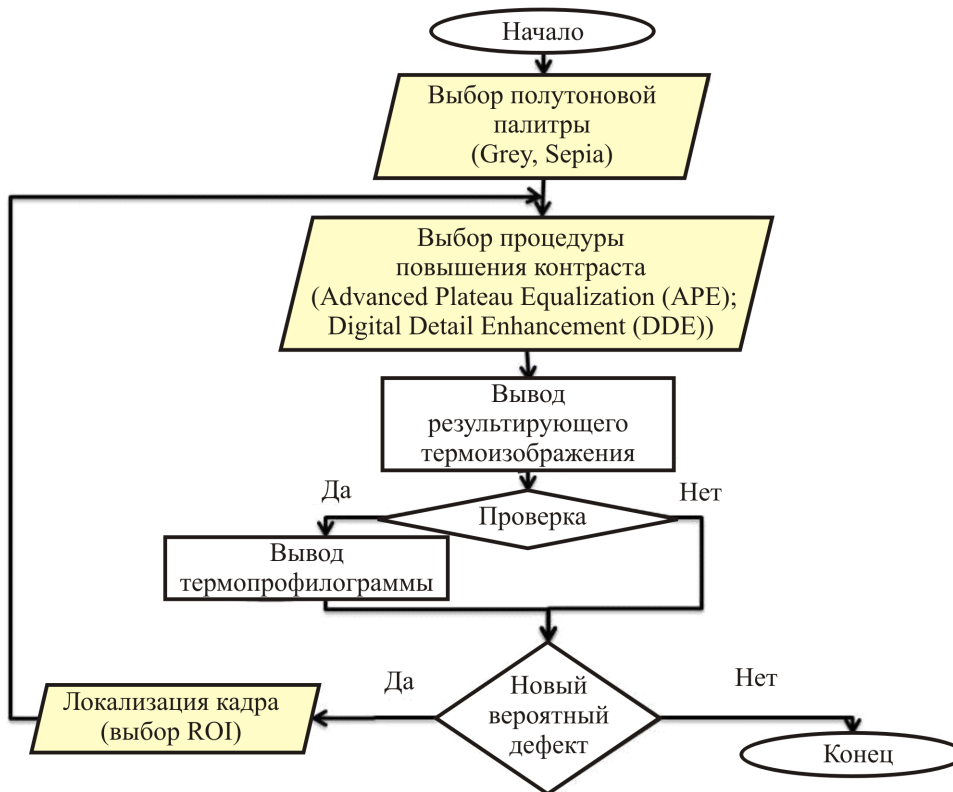


Рис. 6. Схема монокадровой обработки

Исследование вариантов метода выявления повреждений

Метод выявления ударного повреждения на образцах ПКМ был сформирован на базе рассмотрения ряда вариантов, поскольку он зависит, как указывалось выше, от многих факторов. В первую очередь варианты метода обнаружения повреждений рассматривались по характеру излучения образцов материалов при облучении ИТН, когда в процессе неразрушающего контроля обеспечивалось либо собственное, либо отраженное излучение образца. Во вторую очередь рассматривались уже ИТН различного типа, а именно импульсный или «теплое одеяло», а также условия их применения для достижений соответствующего характера излучения образцами при их тепловом нагружении. И далее уже полученные данные тепловизионной съемки образцов ПКМ при различных типах теплового нагружения обрабатывались с использованием разработанной технологии монокадровой обработки, по результатам которых и анализировалась эффективность соответствующих вариантов рассматриваемого метода обнаружения повреждений.

АТНК при собственном излучении образцов. В случае использования импульсного ИТН только собственное излучение образца может быть после прекращения действия импульса, т.е. на этапе остывания ПКМ. Термограммы образцов в этом случае как при использовании стандартной, так и исследуемых процедур представлены на рис. 7. Видно, что применение разработанной технологии обработки данных тепловизионной съемки по сравнению со стандартным подходом на основе процедуры с нелинейным преобразованием гистограммы изображения (PE) привело к качественному улучшению изображения. При этом применение процедуры DDE оказалось наиболее успешным, но недостаточным для обнаружения повреждений, возникших в результате ударного воздействия 10 Дж как на образцах без ЛКП, так и с ним (средние образцы на термограммах, см. рис. 7). Это связано с тем, что для этих повреждений характерны небольшие вмятины на поверхности образца при отсутствии каких-либо структурных изменений в виде разрывов волокон, наличия трещин и т.д. в самом материале в окрестности ударного воздействия.

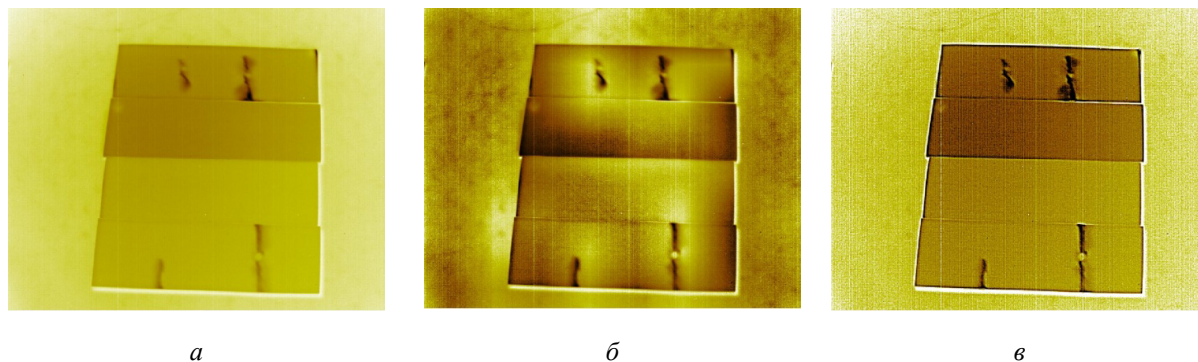


Рис. 7. Результирующие термограммы при использовании различных процедур:
a – стандартная PE; *б* – APE; *в* – DDE

При наличии ЛКП на образце размеры вмятин в области ударного воздействия при визуальном осмотре оказались даже меньше, чем у образцов без него. Тем самым подтвердилась правомерность предпосылки о демпфирующих свойствах ЛКП при ударном воздействии на образец ПКМ. В этом случае имеющиеся малозаметные изменения в геометрии повреждений не привели к изменению поля яркости излучения образца, поскольку направленный коэффициент излучения ЛКП в силу их диффузности слабо зависит от угла излучения.

Применение процедуры локализации изображения в области повреждения с энергией удара 15 Дж не дало позитивных результатов, поскольку структура поверхности повреждения

с такой энергией, как сказано выше, отличается от поверхностной структуры повреждения с энергией удара 10 Дж. При этом поле яркости собственного излучения в окрестности удара практически совпадает с тепловой картиной бездефектных участков образца.

В случае применения ИТН «тёплое одеяло» собственное излучение образцов ПКМ достигается после его снятия с изделия. Здесь эффективность применения данного ИТН оказалось хуже, чем при использовании импульсного источника. К тому же конструкция ИТН, предназначенного для прогрева изделий, оказалась не пригодной для теплого неразрушающего контроля композитных конструкций, поскольку на термограмме отчетливо проявились места расположения нагревательных элементов «одеяла».

АТНК при отраженном излучение образцов. В случае использования импульсного ИТН отраженное образцом его излучение проявляется в момент действия импульса, при этом собственное излучение из-за кратковременности теплового воздействия на образец практически отсутствует.

Совместимость рабочего спектра длин волн тепловизора с поддиапазоном максимальной отражательной способности исследуемых образцов позитивно повлияло на информативность изображений. Особенно это проявилось при локализации термограммы. Так, на рис. 8. представлены субтермограммы двух образцов с повреждениями от удара с энергией 10 Дж, которые получены с использованием процедур обработки APE и DDE, при этом за основу локализации взят участок *S* изображения в окрестности ударного воздействия 15 Дж. Видно, что в результате сканирующего поиска обнаружено повреждение на образце, не имеющем на поверхности ЛКП (рис. 8, верхние образцы), поскольку область вмятины проявилась здесь более четко, что сказалось на характере отраженного излучения. В то же время в случае образца с ЛКП вследствие слабого изменения геометрии из-за демпфирующих свойств покрытия в окрестности повреждения не привело к его обнаружению (рис. 8, нижние образцы).

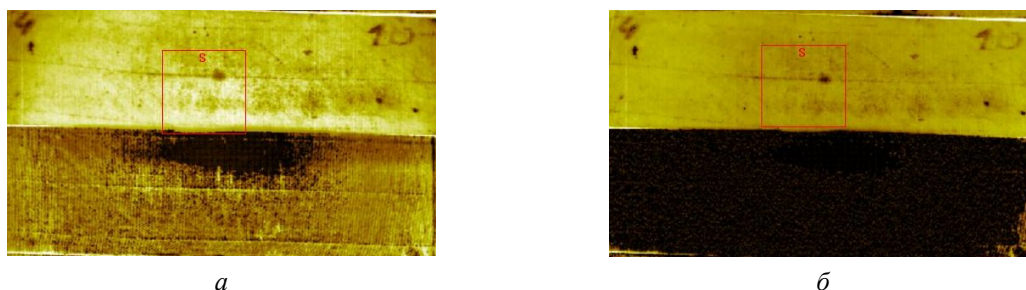


Рис. 8. Субтермограммы двух образцов с повреждениями от удара с энергией 10 Дж при использовании процедур: *a* – APE; *б* – DDE

В случае использования ИТН «тёплое одеяло» обеспечить отраженное излучение от образца не представляется возможным, поскольку при использовании ИТН такого типа его необходимо располагать на некотором расстоянии от поверхности образца, что, наряду с распределенным характером его теплового нагружения, резко снижает интенсивность облучения образца.

Следовательно, при комплексном учёте факторов в условиях, близких к натурным, разработанный метод позволяет обеспечить обнаружение повреждения при ударном воздействии на материал с меньшей величиной, чем в случае использовании стандартной процедуры программного обеспечения тепловизора. Наиболее привлекательным методом обнаружения повреждения является использование отраженного излучения, когда импульсный ИТН выполняет роль «фонарика».

Заключение

1. Разработан метод выявления ударного повреждения ПКМ, в котором учтены тип источника теплового нагружения, наличие покрытия на поверхности образца и характеристики тепловизора с использованием технологии монокадрового анализа тепловизионного изображения, особенностями которой является усиление детализации и контраста термограммы и повышение её наглядности полутоновыми палитрами.

2. Минимальный нижний предел ударного воздействия образца материала, при котором осуществлялось обнаружение повреждения, достигался за счёт сужения области исследований, выделения субтермограммы и применения к ней процедуры детализации изображения *Digital Detail Enhancement*.

3. С использованием разработанного метода сформирован алгоритм сканирующего поиска, позволяющий реализовать достаточно простые и производительные технологии для выявления повреждений на натуральных конструкциях из ПКМ.

4. Полученные результаты работы будут использованы при дальнейших исследованиях по созданию мобильной системы мониторинга состояния конструкции ЛА в рамках АНТК.

Библиографический список

1. NDT Systems with active Thermography for R&D [Электронный ресурс]. – URL: https://automationtechnology.de/cms/wp-content/uploads/2015/06/IRNDT_eng_web.pdf (дата обращения: 20.11.2022).
2. Non-destructive testing technology [Электронный ресурс]. – URL: https://www.opgal.com/wp-content/uploads/2016/04/NDT_All-Products-Brochure_WEB.pdf (дата обращения: 20.11.2022).
3. Поплавски Д. Исследование сложной структуры композитов из углепластика/стеклопластика методом активной термографии // В мире неразрушающего контроля (NDT World). – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 18–20.
4. Сук Вай Вонг. ИК-дефектоскопия фотоэлектрических панелей как метод быстрого поиска неисправностей // Современная электроника. – 2016. – № 2. – С. 22–25.
5. Shepard S.M. Flash Thermography of Aerospace Composites // IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires. – Octubre 2007. – 7 p.
6. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2013. – 542 с.
7. 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.
8. Вавилов В.П., Казьмин Е.А. Сравнение методов обработки термоизображений при тепловом неразрушающем контроле // КИМИЛА-2017: Сб. тр. II Отраслевой конф. по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. – 2017. – С. 28–33.
9. Vickers V.E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery // Optical Engineering. – July 1996. – 35 (7). – P. 1921–1926.
10. 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 Sensing. – 2019. – № 11 (7). – P. 849.
11. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems / F. Branchitta, M. Diani, G. Corsini, A. Porta // Optical Engineering. – 2008. – 47 (7). – Art. 076401. – P. 1–14.
12. Особенности теплового неразрушающего контроля ударных повреждений изделий из полимерных композиционных материалов / С.Л. Чернышев, М.Ч. Зиченков, В.И. Голован, А.М. Зайцев, Е.А. Казьмин, И.Е. Ковалев, А.Б. Корнилов, Г.А. Корнилов, А.В. Смотров, А.А. Чернявский, А.О. Шустров // Дефектоскопия. – 2020. – № 9. – С. 28–39.
13. Руководство пользователя ALTAIR, Версия 5. – FLIR SYSTEMS. – 2008. – 130 с.
14. 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. Смотров // Авиационная промышленность. – 2021. – № 1. – С. 36–46.

15. ГОСТ 33496-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом. – М., 2015.
16. Руководство пользователя Hensel TRIA 6000 S Generator Power Pack. – 2010. – 46 с.
17. Руководство пользователя ThermaCAM Researcher Pro, Версия 2.10. – FLIR SYSTEMS, 2010. – 168 с.
18. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в MatLab. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
19. Sousa M.J., Moutinho A., Almeida M. Thermal Infrared Sensing for Near Real-Time Data-Driven Fire Detection and Monitoring Systems // *Sensors*. – 28 Nov. 2020. – № 20 (23). – Art. 6803. – P. 29.
20. Руководство пользователя ResearchIR, Версия 4. – FLIR SYSTEMS, 2016. – 228 p.

References

1. NDT Systems with active Thermography for R&D [Electronic resource]. URL: https://automationtechnology.de/cms/wp-content/uploads/2015/06/IRNDT_eng_web.pdf (Date of access: 20.11.2022).
2. Non-destructive testing technology [Electronic resource]. URL: https://www.opgal.com/wp-content/uploads/2016/04/NDT_All-Products-Brochure_WEB.pdf (Date of access: 20.11.2022).
3. Poplavski D. Issledovaniye slozhnoy struktury kompozitov iz ugleplastika/stekloplastika metodom aktivnoy termografii [Investigation of the complex structure of carbon fiber / fiberglass composites by active thermography]. *V MIRE NERAZRUSHAYUSHCHEGO KONTROLYA* (NDT World), 2016, vol. 19, no. 1, pp. 18-20.
4. Suk Vay Vong. IK-defektoskopiya fotoelektricheskikh paneley kak metod bystrogo poiska neispravnostey [IR flaw detection of photovoltaic panels as a method for quick troubleshooting]. *Sovremennaya elektronika*, 2016, no.2, pp. 22-25.
5. Shepard S.M. Flash Thermography of Aerospace Composites. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, Octubre 2007, 7 p.
6. Vavilov V.P. Infrakrasnaya termografiya i teplovoy control [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, Spektr, 2013, 542 p.
7. 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.
8. Vavilov V.P., Kazmin Ye.A. Sravneniye metodov obrabotki termoizobrazheniy pri teplovom nerazrushayushchem kontrole [Comparison of thermal image processing methods for thermal non-destructive testing]. Proceedings of the II Industry Conference on Measuring Equipment and Metrology for Aircraft Research KIMILA-2017, 2017, pp. 28-33.
9. Vickers V.E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery. *Optical Engineering*, no. 35 (7), pp. 1921-1926, July 1996.
10. 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 Sensing*, 2019, no. 11 (7), p. 849.
11. F. Branchitta, M. Diani, G. Corsini, A. Porta. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems. *Optical Engineering*, no. 47 (7), Art. 076401, pp. 1-14, 2008.
12. Chernyshev S.L., Zichenkov M.Ch., Golovan V.I., et. al. sobennosti teplovogo nerazrushayushchego kontrolya udarnykh povrezhdeniy izdeliy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Peculiarities of Thermal Non-Destructive Inspection of Impact Damage of Products Made of Polymer Composite Materials]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, no. 9, pp. 28-39.
13. ALTAIR User Manual, Version 5. FLIR SYSTEMS, 2008, 130 p.
14. Zichenkov M.Ch., Kovalev I.E., Kovalev N.I., et. al. Kontseptualnyye aspekty razrabotki perechnya standartnykh obraztsov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya razvitiya metodologii aktivnogo teplovogo nerazrushayushchego kontrolya izdeliy [Conceptual aspects of the development of a list of reference materials from polymer composite materials for the development of the methodology of active thermal non-destructive testing of products]. *Aviation Industry*, 2021, no. 1, pp. 36-46.
15. GOST 33496-2015 «Kompozity polimernyye. Metod ispytaniya na soprotivleniye povrezhdeniyu pri udare padayushchim грузом» [Polymer composites. Test method for resistance to damage when struck by a falling weight].
16. User manual Hensel TRIA 6000 S Generator Power Pack, 2010, 46 p.

17. User manual ThermaCAM Researcher Pro, version 2.10. FLIR SYSTEMS, 2010, 168 p.
18. R. Gonsales, R. Vuds, S. Eddins Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v MatLab [Digital image processing in MatLab]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2006, 616 p.
19. M.J. Sousa, A. Moutinho, M. Almeida Thermal Infrared Sensing for Near Real-Time Data-Driven Fire Detection and Monitoring Systems. *Sensors*, no.20 (23), Art. 6803, 28 Nov., 2020, p. 29.
20. User manual ResearchIR, version 4. FLIR SYSTEMS, 2016, 228 p.

Об авторе

Корнилов Глеб Андреевич (Жуковский, Россия) – начальник научно-исследовательской лаборатории, Центральный аэрогидродинамический институт имени Н.Е. Жуковского (Жуковский, 140180, 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 N.E. Zhukovsky (1, Zhukovsky str., 140180, Zhukovsky, 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%.

Поступила: 29.11.2022

Одобрена: 20.01.2023

Принята к публикации: 28.02.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Корнилов, Г.А. Метод инфракрасной термографии для выявления повреждений на композиционных материалах при ударных воздействиях с малой энергией / Г.А. Корнилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 72. – С. 21–32. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.02

Please cite this article in English as: Kornilov G.A. Infrared thermography technique for damage detection on composite materials under low-energy impact. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 72, pp. 21-32. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.02