

УДК 620.192.63

Применение программных алгоритмов обработки изображений, полученных в ходе контроля изделий из композиционных материалов методом активной термографии

Котовщиков И.О.¹

ilya@locus.spb.ru

¹ООО «Локус», г. Санкт-Петербург

Аннотация:

В данной работе приведён анализ результатов экспериментальных исследований образцов из композиционных материалов методом активной термографии с использованием программных алгоритмов обработки инфракрасных изображений. Результатом исследования являются практические рекомендации по использованию методов обработки и анализа тепловых изображений.

Ключевые слова:

активная термография, композиционные материалы, обработка ИК изображений

1. Введение

Композиционные материалы (КМ), благодаря своим уникальным свойствам (высокая теплостойкость, высокие прочностные характеристики при повышенной и сверхвысокой температурах, низкая плотность, низкий коэффициент линейного термического расширения и т.д.), находят широкое применение в ракетно-космической, авиационной и других областях техники [1, 2, 3].

Как в процессе изготовления, так и во время эксплуатации, на поверхности и в объёме изделий из КМ возникают дефекты. Наличие таких дефектов, как: расслоение, непроклеи, трещины, повреждения поверхностных слоёв, и т. д., сильно сказывается на эксплуатационных и физико-механических свойствах изделий из КМ [4]. Таким образом, возникает задача неразрушающего контроля (НК) изделий из КМ. Сложная неоднородная структура композитов накладывает ограничения на применение традиционных методов НК в решении задачи контроля качества изделий из КМ. Выбор метода НК определяется видом композиционного материала, видом характерных дефектов в нём, условиями эксплуатации изделия и условиями контроля.

Одним из перспективных методов НК изделий из КМ является метод активного теплового контроля (активной термографии). На сегодняшний день, целесообразность использования термографических методов НК общепризнана, а области применения оборудования для термографического контроля постоянно расширяются [5, 6].

Активная термография – это передовой метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменения температуры объекта контроля (ОК) в условиях внешнего теплового возбуждения. Внешним источником тепла, приложенного к материалу, могут быть галогенные лампы, импульсные лампы, ультразвуковые волны или другие источники тепловой энергии. Возбуждение вызывает тепловой отклик на поверхности ОК, который регистрируется инфракрасной (ИК) камерой. Результатом процедуры контроля является информация о поверхностных и подповерхностных дефектах или внутренних неоднородностях. Схема контроля методом активной термографии приведена на рисунке 1.



Рис. 1 – Схема контроля методом активной термографии

Рассмотрим нагрев с помощью галогенных ламп. Внешняя энергия возбуждения, в таком случае, действует на поверхность исследуемого материала с использованием энергии электромагнитной волны (УФ, видимая или ИК). Эта энергия преобразуется в тепло в процессе поглощения, создавая тепловые волны, которые распространяются в материале по закону теплопроводности. Наличие внутренних дефектов влияет на процесс распространения тепловых волн. Внутренние дефекты воздействуют на тепловые волны как барьеры, создавая локальные изменения амплитуды и фазы, которые наблюдаются в картине распределения температуры по поверхности. Теплопроводность через твердое тело представляет собой сложную трехмерную задачу, которая может быть описана упрощенной версией закона теплопроводности Фурье (также называемого тепловым уравнением) внутри ОК:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

где $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$ (выраженный в $[м^2/с]$) – коэффициент температуропроводности ОК, k (измеряется в $[Вт/м \cdot К]$) – его теплопроводность, ρ (выраженная в $[кг/м^3]$) – его плотность, C_p (в $[Дж/кг \cdot К]$)

– удельная теплоёмкость. Температура T является функцией от x , y , z и t , а $\frac{\partial Q}{\partial t}$ – полная тепловая энергия возбуждения.

В момент, когда процесс нагрева поверхности завершается, градиент энергии переносится с поверхности в объем, где перенос энергии и его скорость зависят от температурного градиента и теплопроводности материала. Для расчета переноса тепла за счет теплопроводности используются алгебраические методы анализа, использующие градиент температуры. Этот градиент является направленной производной, которая указывает направление максимальной скорости изменения температуры. Направление теплового потока всегда будет противоположно направлению температурного градиента, так как самопроизвольная передача энергии возможна только от более нагретой точки к менее нагретой (второй закон термодинамики). Это направление максимальной теплопередачи будет перпендикулярно поверхностям равной температуры (изотермам), окружающим источник тепла.

Современные системы НК методом активной термографии используют сложные программные алгоритмы в процессе обработки и анализа ИК изображений, с целью повышения качества контроля. В данном исследовании проанализирован опыт применения некоторых методов обработки и анализа тепловых изображений, и сформулированы рекомендации по их практическому использованию.

2. Проведение контроля изделий из КМ методом активной термографии

Для реализации метода активной термографии, авторы использовали систему NDTherm[®] (рисунок 2). Для теплового возбуждения в данной системе используются четыре галогенных лампы. Сразу после излучения теплового импульса, система регистрирует динамику температуры поверхности ОК с помощью ИК камеры, в виде последовательности её ИК изображений (термограмм). Далее, с помощью специального программного

обеспечения установленного в блоке обработки и анализа изображений, информация о динамике температуры обрабатывается программными алгоритмами.

а)



б)



Рис. 2 – Система активной термографии NDTherm[®]: а) блок обработки и анализа изображений; б) блок нагрева и регистрации динамики температуры

2.1 Алгоритмы обработки изображений.

Базовая поставка системы NDTherm[®] включает в себя набор программных алгоритмов для анализа ИК изображений, описанный ниже.

Метод реконструкции (восстановления)

Это базовый метод обработки первичной информации о динамике температуры поверхности ОК. Метод использует аппроксимацию с помощью полинома, разработанную фирмой Orgal, для уменьшения временного и пространственного шума и восстановления более четких изображений изменения теплового сигнала с течением времени. Общий вид интерполяционной функции выражается следующей формулой:

$$\varphi(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_nx^n$$

Для применения этого метода должны быть примерно известны теплофизические свойства материала. Продолжительность нагрева должна быть, по крайней мере, достаточной для установления равномерного нагрева поверхности объекта контроля. После получения базовых термограмм, система позволяет выбрать степень полиномиального соответствия n . Для однородных материалов следует выбрать самую низкую степень ($n \sim 5$), чтобы снизить искажения изображения при полиномиальной подгонке. Для более сложных структур лучше использовать более высокую степень полиномиальной аппроксимации (от 7 до 9), которая определяется материалом объекта контроля. В восстановленных изображениях дефектные зоны проявятся в виде областей с более высокой или более низкой температурой по отношению к бездефектным зонам (зависит от тепловых свойств, как материала, так и дефекта). Например, в армированном углеродным волокном пластике (АУВП) расслоения будут отображаться как более яркое пятно, чем окружающая среда, так как коэффициент диффузии несплошности выше, чем у основного материала, а отраженное тепло приводит к увеличению температурного сигнала. В то же время, металлические включения, оставшиеся от производственного процесса, будут отображаться в виде более темной области.

Метод первой производной

Первая производная функции $T(t)$ по времени демонстрирует скорость охлаждения поверхности исследуемого материала. На скорость охлаждения влияет наличие дефектов на пути тепловой волны, следовательно, контраст температур усиливается. Преимущество метода первой производной заключается в усилении градиента яркости на изображении, вызванного наличием дефектов. Как следствие, метод первой производной улучшает выявляемость дефектов, что позволяет находить очень слабые дефекты на восстановленных изображениях.

Метод второй производной

Вторая производная во времени $\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$ определяется скоростью изменения скорости охлаждения («ускорение охлаждения»). Метод второй производной по времени позволяет определить глубину залегания дефекта. Неглубокий дефект проявится раньше, чем установится максимальный контраст в восстановленном изображении. Максимумы или минимумы в изображениях, полученных этим методом, коррелируют непосредственно с глубиной залегания и толщиной дефекта (длиной вдоль направления распространения тепловой волны), поскольку эти значения представляют собой время, необходимое тепловой волне для прохождения через дефектную область. Благодаря своему физическому определению, вторая производная базовых тепловых изображений по времени очень чувствительна к нарушениям процесса диффузии тепловых волн и может быть использована для оценки физических свойств, таких как глубина и размер.

Таким образом, производные по времени более чувствительны к изменениям температуры, чем восстановленные тепловые изображения. Производные более высоких порядков не имеют никакой физической интерпретации, поэтому дальнейшее улучшение контраста дефекта не наблюдается.

Метод обнаружения фазы (Pulsed Phase)

В этом методе временная область преобразуется в частотную область методом Фурье-преобразования; поэтому самые глубокие и мелкие дефекты в ОК показаны на первом изображении. При сканировании фазовых изображений дефекты отображаются последовательно. Обнаружение фазы менее подвержено влиянию отражателей окружающей среды, вариаций излучательной способности, неоднородного нагрева, геометрии поверхности и ориентации объектов, чем исходные тепловые данные.

Корреляция

Метод корреляции устанавливает соотношение между наличием дефекта, параметрами времени, и пространственными координатами,

генерируя 4 изображения. Первое изображение описывает максимальное значение корреляционной функции времени, второе – максимальное значение корреляционной функции местоположения значений сигнала. Остальные два описывают минимумы значений тех же корреляционных функций, что и первые два изображения. Наиболее эффективен этот метод анализа в задаче контроля композиционных материалов. Этот метод можно применить для анализа термограмм полученных методами производных, с целью исследования вызывающих сомнения участков ОК с возможными дефектами.

2.2 Применение программных алгоритмов обработки изображений

Компания ООО «Локус» имеет богатый опыт сотрудничества с предприятиями-изготовителями КМ, такими как: АО УНИИКМ, ПАО «Компания «Сухой», ФГУП ЦАГИ им. Жуковского, СибНИА им. Чаплыгина и др. Система термографического контроля NDTherm[®] опробована в задаче контроля качества широкого спектра изделий из КМ.

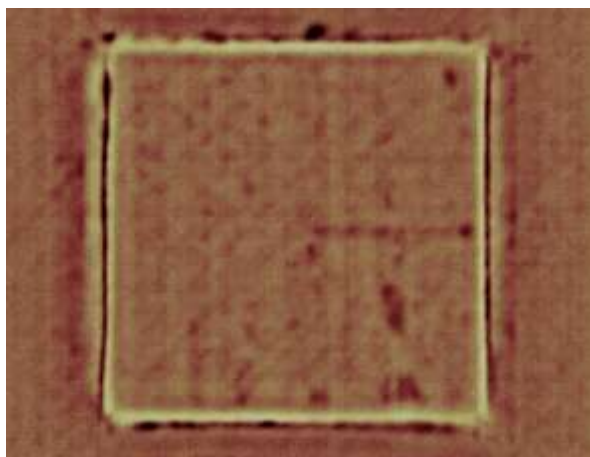
Максимальный контраст между областями ОК с различными теплофизическими характеристиками наблюдается в термограммах, полученных методами производных (рисунок 3 а). Как было сказано ранее, КМ имеют сложную внутреннюю структуру, вследствие чего, чувствительные методы производных проявляют структурные элементы КМ и границы между ними.

В большинстве проведённых экспериментов наилучший результат по критерию наглядности представления результатов контроля продемонстрировал метод обнаружения фазы (рисунок 3 б). Алгоритм, лежащий в основе метода обнаружения фазы, позволяет использовать данный метод только для анализа процесса охлаждения ОК. На термограммах, полученных данным методом, глубина и площадь несплошностей пропорциональны яркости и площади контрастных участков.

Методы корреляций, также используемые для анализа процесса охлаждения ОК, позволяют получать термограммы сверхвысокой

контрастности с отображением всех обнаруженных неоднородностей на одном изображении. Данные методы используются в случаях, когда чувствительности методов первой и второй производных недостаточно. Использование методов корреляций осложнено неоднородностью внутренней структуры КМ.

а)



б)

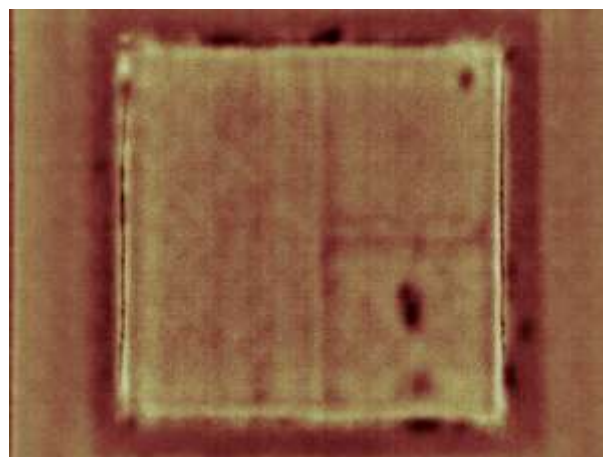


Рис. 3 – Результат обработки ИК изображений образца из углепластика: а – методом первой производной; б – методом обнаружения фазы

3. Выводы и рекомендации

Благодаря уникальным теплофизическим свойствам наиболее используемых КМ (углепластик, углерод-углеродные композиционные материалы и т.д.), метод активной термографии имеет большие перспективы в задаче НК изделий из КМ. Многочисленные эксперименты по обнаружению заложенных искусственных дефектов в образцах из КМ методом активной термографии демонстрируют принципиальную возможность промышленного применения данного метода НК.

Сложность структуры КМ приводит к необходимости использования дополнительных алгоритмов обработки изображений, полученных в ходе контроля изделий из композиционных материалов методом активной термографии. Существует множество методов обработки и анализа тепловых изображений ОК, каждый из которых имеет своё назначение.

В системе активной термографии NDTherm[®] фирмы Orgal для обработки тепловых изображений ОК используются наиболее универсальные

методы: восстановления, первой производной, второй производной, обнаружения фазы и методы корреляций. Метод восстановления является базовым уровнем обработки ИК изображений ОК, который может быть использован для общей оценки динамики температурного поля, и необходим для реализации более сложных алгоритмов. Исследование изделий из КМ с помощью системы NDTherm[®] показало, что наиболее наглядным и удобным для оператора является метод обнаружение фазы. Методы производных являются высокочувствительными методами, полезными при поиске мелких дефектов и определении геометрических параметров дефектов (в том числе высоты). Корреляционные методы позволяют добиться максимально контрастного изображения, на котором проявляются даже самые мелкие дефекты. Использование корреляционных методов осложняется сложной структурой КМ.

Стоит отметить, что фирма Orgal предоставляет возможность снабжения системы термографического контроля NDTherm[®] дополнительными алгоритмами обработки и анализа тепловых изображений, разработанными под конкретную задачу.

Литература

1. Барынин В. А., Будадин О. Н., Кульков А. А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: Спектр, 2013. – 242 с.
2. Kapadia A. Non Destructive Testing of Composite Materials. Best Practice Guide TWI Ltd National Composites Network.
3. Троицкий В. А., Глуховский В. Ю. Термографический контроль как метод, предшествующий стандартным видам технической диагностики // Междунар. конф. и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: Матер. конф. – Гурзуф, 2011. – С. 61–66.

4. Воробей В. В., Маркин В. Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.
5. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
6. Новостная страница сайта компании «FACC AG» [Электронный ресурс]: <http://www.facc.com/en/News/News-Press/Testing-competence-in-lightweight-components-FACC-receives-Boeing-qualification-for-active-thermography>