УДК 620.179.13

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ДЕФЕКТОВ В АКТИВНОМ ТЕПЛОВОМ КОНТРОЛЕ

© 2019 г. А.О. Чулков^{1,*}, Д.А. Нестерук^{1,**}, В.П. Вавилов^{1,***}

¹Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30 E-mail: *chulkovao@tpu.ru; **nden@tpu; ***vavilov@tpu.ru

> Поступила в редакцию 13.02.2019; после доработки 19.03.2019 Принята к публикации 24.05.2019

Алгоритм позволяет упростить процедуру обработки результатов теплового контроля, проводимой с целью как обнаружения скрытых дефектов, так и оценки их поперечных размеров и формы. Его применение требует определенного участия и опыта оператора-термографиста, а также предварительной подготовки исходных данных путем применения алгоритмов, повышающих отношение сигнал/шум. Алгоритм включает выделение дефектных зон на термограмме объекта контроля, автоматизированную идентификацию точек с экстремальными сигналами и попиксельный пороговый анализ зон, прилегающих к этим точкам, завершающийся построением бинарных карт дефектов.

Ключевые слова: инфракрасная термография, тепловой контроль, поперечный размер дефекта, автоматизированный контроль, композиционные материалы.

DOI: 10.1134/S0130308219080074

введение

В тепловом контроле (ТК) и, особенно, дефектометрии, конкурируют две концепции, одна из которых связана с использованием эталонных (бездефектных) точек, а вторая основана на использовании безэталонных параметров, например, фазы Фурье [1]. Чувствительность метода и достоверность оценок параметров дефектов обычно выше, если рядом с дефектной областью идентифицируют эталонную зону, но при этом существенную роль играет опыт термографиста. В [2] описан алгоритм обработки данных ТК, основанный на автоматизированном обнаружении областей с минимальными и максимальными значениями температур. В активном ТК это позволяет выявить центры дефектных областей. Но поскольку требования к минимальным обнаруживаемым дефектам обычно связаны с поперечными размерами дефектов, например, в авиации требуется обнаруживать расслоения размером 10×10 мм, то необходимо определять размеры температурных аномалий, связанные с истинными размерами дефектов, а также оценивать степень разрушения материала [3]. Например, ударные повреждения, являющиеся типичным эксплуатационным дефектом в авиационных композиционных панелях, представляют собой конгломерат отдельных трещин и расслоений со специфическим распределением внутри материала, особенно это характерно для анизотропного углепластика [4, 5]. В настоящей работе описан автоматизированный алгоритм оценки размеров и положения скрытых дефектов, который основан на попиксельном анализе дефектной зоны, прилегающей к «очагу» дефекта. Классификацию точек изображения на дефектные и бездефектные выполняют по амплитуде температурного сигнала. Данный алгоритм, реализованный в программе ThermoFit Pro (НИ ТПУ), позволяет выявлять температурные аномалии сложной формы, оценивать их поперечные размеры с учетом диффузии тепла и выводить результат в виде бинарных карт дефектов.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Работа алгоритма анализа дефектных зон продемонстрирована на последовательности инфракрасных (ИК) термограмм, полученных путем численного моделирования с помощью программы ThermoCalc-3D. Моделировали пластину из анизотропного углепластика размером $220 \times 170 \times 6$ мм, содержащую три дефекта в виде фторопластовых вставок размером $20 \times 20 \times 0,1$ мм на глубинах 1, 3 и 5 мм. Мононаправленные слои углепластиковых волокон толщиной 1 мм располагались под углом 45° относительно друг друга. Изделие равномерно нагревали тепловым потоком мощностью 2 кВт/м² в течение 5 с при общей длительности теплового процесса 60 с и частоте регистрации термограмм 1 Гц. Результаты моделирования односторонней процедуры ТК приведены на рис. 1. Три дефектные отметки характеризуются зонами повышенной температуры, вытянутыми под углом 45° вследствие анизотропии композита.



Рис. 1. Численное 3D-моделирование одностороннего ТК углепластика толщиной 6 мм с дефектами в виде фторопластовых вставок:

а — ИК-термограмма при 60 с; *б* — изменение температурного сигнала над дефектами D1—D3, расположенными на глубинах 1, 3 и 5 мм соответственно.

С помощью ранее разработанного алгоритма компьютерная программа обработки ИК-термограмм в автоматизированном режиме идентифицировала точки с максимальной и минимальной температурами, расположенные соответственно над центрами дефектов и в бездефектной области [2]. Упрощенная схема работы алгоритма показана на рис. 2 для дефекта квадратной формы, температурный сигнал над которым имеет характерный «гауссовский» вид. Опрос пикселей, прилегающих к зоне с экстремальной температурой, производят на определенную «глубину» по выбору оператора с целью выявления дефектных зон, оторванных от основной.



Рис. 2. Распределение температуры над дефектом квадратной формы (числа соответствуют температуре в отдельных точках, цвет имитирует разделение дефектных областей по порогам).

Предположим, что анализируемая область (ее задает оператор), в которой происходит поиск максимальных значений температур, соответствует центральной зоне дефектной отметки (желтый цвет на рис. 2), размер, например, 3×3 пикселя. Заметим, что речь идет об избыточных температурах, отсчитываемых от бездефектного уровня. После выбора зоны с максимальной температурой, расположенной над центром дефекта, усредняют температуру по 9 пикселям, а результирующему значению, равному 25,3 °C (см. рис. 2), присваивают «дефектный» статус. Затем начинают опрос прилегающих к выделенной зоне пикселей, классифицируя их либо как «дефектные», либо как «бездефектные». Классификацию осуществляют путем сравнения амплитуды текущего пикселя с пороговым значением, который устанавливает оператор. Порог задают в процентах от экстремального температурного сигнала. Например, порог 75 % на рис. 2 составляет 19 °C. Таким образом,

пиксели, температура в которых ниже 19 °С, (фиолетовая и голубая области на рис. 2), считаются «бездефектными», остальные — «дефектными». Поиск прекращается, когда слой пикселей, прилегающий к выявленным «дефектным» слоя, начинает характеризоваться сигналом ниже установленного порога.

При установлении порога оператор руководствуется уровнем шума в конкретной процедуре испытаний, а также степенью размытия границ из-за диффузии тепла. На конечном этапе работы алгоритма строят бинарную карту дефектов, на которой размер и форма дефектных отметок коррелируют с истинными размерами и формой скрытых дефектов. Указанная процедура может быть применена для любого типа ИК-термограмм, а также изображений других параметров обработки, например, фазограмм, коррелограмм и др.

Пример применения алгоритма автоматизированного обнаружения дефектов в последовательности рис. 1 приведен на рис. 3. Анизотропия композита проявляется в вытягивании дефектной отметки вдоль волокон материала. Это отчетливо видно на примере дефектной отметки, соответствующей дефекту D1 на глубине 1 мм. Истинные размеры дефектов показаны красными линиями (рис. 3).



Рис. 3. Бинарные карты дефектов для ИК-термограммы рис. 1*а* с различными порогами дефектности: *а* — порог дефектности 50 % от среднего значения над центром дефекта; *б* — 75 %; *в* — 85 %.

Следует заметить, что при использовании описанного алгоритма видимый размер дефекта зависит от времени контроля и примененного порога, что делает погрешность численных оценок достаточно высокой. Согласно принципу раннего обнаружения, наиболее близкие к истинным видимые размеры дефектов могут быть оценены при ранних временах наблюдения, например, сразу после окончания стадии нагрева; но это возможно при низком уровне тепловых шумов и помех [6, 7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 приведен пример применения вышеописанного алгоритма к экспериментальной последовательности ИК-термограмм, полученной при одностороннем ТК изделия из углепластика толщиной 2,5 мм. Изделие содержало 4 искусственных дефекта в виде фторопластовых вставок с поперечными размерами 15×15 и 20×20 мм при толщине 0,1 и 0,2 мм, расположенных на глубине 0,5 мм.





Рис. 4. Автоматизированная оценка дефектов в углепластике толщиной 2,5 мм: *а* — ИК-термограмма (поперечные размеры дефектов 15×15 и 20×20 мм при толщине 0,1 и 0,2 мм); *б* — бинарная карта дефектов (порог 75 %).

Несмотря на некоторую неоднородность температурного фона, что характерно для экспериментальных данных, все дефекты надежно обнаруживаются (см. рис. 4). Однако отметка наименьшего дефекта $15 \times 15 \times 0,1$ мм содержит включения в виде «бездефектных» пикселей (см. бинарную карту на рис. 4 δ). Это обусловлено низкой амплитудой температурных сигналов, сравнимых с уровнем шума, а также изменением такого параметра автоматизированного обнаружения как глубина опроса пикселей (в данном случае равна 3 пикселям). Важно отметить, что при обнаружении дефектов оператор вручную выбирал четыре области (соответственно 4 дефектам) для поиска экстремальных значений температуры. Кроме того, некорректное задание величины порога дефектности приводит к увеличению дефектной области. Оптимизация выбора порога требует дальнейшего анализа.

Как отмечено выше, при обнаружении центральной точки дефектной отметки начинается опрос прилегающих к ней пикселей в поисках «дефектных». Однако после того, как дефектная область разрослась и прилегающие к ней пиксели (слоем в один пиксель) характеризуются сигналом, ниже порога дефектности, продолжается опрос пикселей на глубину, установленную оператором. Таким образом проводят анализ дефектных областей сложной формы, например, ударных повреждений в композитах. Пример такого дефекта в углепластике, имеющего известную форму «бабочки», приведен на рис. 5.



Рис. 5. Термограмма ударного повреждения в углепластиковом композите на стороне, противоположной удару.

На рис. 6 приведены результаты оценки ударного повреждения (ИК-термограмма рис. 5) с помощью предложенного алгоритма для различных величин порогов и глубины опроса пикселей.



Рис. 6. Оптимизация методики автоматизированного обнаружения дефектов сложной формы (ударное повреждение в углепластике).

Особенностью данного дефекта является его составной характер: дефектная отметка включает две области, разделенные точкой удара и характеризующиеся различной амплитудой температурного сигнала. На первом этапе работы алгоритма был обнаружен «очаг» дефекта A, соответствующий наибольшему расслоению композита (порог дефектности 60 % при глубине опроса пикселей, равной 20). Путем изменения порога и глубины опроса была выявлена вторая зона расслоения Б, причем наилучший результат был получен при пороге дефектности, равном 30 %. Следует заметить, что для обнаружения зоны Б потребовался опрос пикселей, прилегающих к зоне A, на глубину 20 пикселей (процесс увеличения глубины опроса пикселей показан в виде зон черного цвета на желтом фоне рис. 6).

После подсчета количество пикселей, идентифицированных как «дефектные», завершающим этапом работы алгоритма является определение площади дефектной отметки, которая служит в качестве оценки истинных размеров скрытого дефекта (используют размещаемый на контролиру-емой поверхности маркер или задают масштаб).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм позволяет упростить процедуру обработки результатов ТК, проводимой как с целью обнаружения скрытых дефектов, так и оценки их поперечных размеров и формы. Использование алгоритма требует определенного участия и опыта оператора-термографиста, а также предварительной подготовки исходных данных путем применения алгоритмов, повышающих отношение сигнал/шум. Алгоритм включает выделение дефектных зон на термограмме объекта контроля, определение точек с экстремальными сигналами («очагов» дефектов) и попиксельный пороговый анализ зон, прилегающих к этим точкам, завершающийся построением бинарных карт дефектов.

Исследования проведены при поддержке стипендии Президента РФ (проведение экспериментов), а также гранта Российского научного фонда № 17-79-10143 (разработка алгоритма программы, обработка изображений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maldague X*. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. Wiley, 2001. 684 p.

2. *Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A.* An Automated Practical Flaw-Identification Algorithm for Active Thermal Testing Procedures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 4. P. 278 — 282.

3. *Ranjit S., Kang K., Kim W.* Investigation of Lock-in Infrared Thermography for Evaluation of Subsurface Defects Size and Depth // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2015. V. 16. No. 11. P. 2255 — 2264.

4. Gustin J., Joneson A., Mahinfalah M., Stone J. Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites // Composite Structures. 2005. V. 69. No. 4. P. 396 — 406.

5. Duan Y., Zhang H., Maldague X., Ibarra-Castanedo C., Servais P., Genest M., Sfarra S., Meng J. Reliability assessment of pulsed thermography and ultrasonic testing for impact damage of CFRP panels // NDT and E International. 2019, V. 102. P. 396 — 83.

6. *Krapez J.-C., Balageas D.L., Deom A., Lepoutre F.* Early detection by stimulated infrared thermography. Comparison with ultrasonics and holo/shearography // Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials. 1994, V. 262. P. 303—321.

7. *Almond D.P., Lau S.K.* Edge effects and defect sizing by transient thermography // Applied Physics Letters. 1993. V. 62. No. 25. P. 247–252.