

КОНТРОЛЬ НАРУШЕНИЙ АДГЕЗИИ И ДЕФЕКТОВ, ЗАПОЛНЕННЫХ ВОДОЙ, В МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТАХ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Гозэн Лю¹, Вэйчэн Гао^{1,*}, Вэй Лю¹, Сюнхуэй Цзоу¹, Цзяньсюнь Сюй¹, Тао Лю²

¹Харбинский технологический институт, Харбин, Китай

²Харбинский университет коммерции, Харбин, Китай

Email: *gaoweicheng@sina.com

Поступила в редакцию 21.01.2023; после доработки 19.03.2023

Принята к публикации 28.03.2023

Многослойные композиты с сотовым наполнителем (МСКСЗ) активно используются в аэрокосмической, автомобильной и судостроительной промышленности благодаря легкому весу, высокой термостойкости, высокой прочности и сопротивлению усталости. В данной работе инфракрасная термография использовалась для обнаружения нарушения адгезии и дефектов, заполненных водой, в МСКСЗ-образцах при импульсной тепловой стимуляции. Для улучшения эффективности контроля дефектов исходные последовательности инфракрасных изображений обрабатывались с помощью методов динамической тепловой томографии (ДТТ), общего гармонического искажения (ОГИ) и метода главных компонент (МГК). Результаты показывают, что при контроле МСКСЗ идентификация дефектов может быть улучшена при использовании обозначенных выше методик обработки изображений, при этом отношение сигнал/шум (ОСШ) может быть значительно улучшено с помощью метода ОГИ. Это подтверждается тем, что нарушение адгезии и дефекты, заполненные водой, могут достоверно обнаруживаться с использованием такого метода неразрушающего контроля, как импульсная инфракрасная томография.

Ключевые слова: многослойные композиты с сотовым наполнителем (МСКСЗ), импульсная инфракрасная томография, динамическая тепловая томография (ДТТ), метод главных компонент (МГК), общее гармоническое искажение (ОГИ).

DOI: 10.31857/S0130308223050056, EDN: ZEFRGM

1. ВВЕДЕНИЕ

С быстрым развитием авиационных технологий материалы, используемые в конструкциях самолетов, постепенно переходят от алюминиевых сплавов и сталей к композитным материалам. Многослойные композиты с сотовым наполнителем (МСКСЗ) [1] широко используются в ключевых элементах, таких как обшивка фюзеляжа, встроенные воздухозаборники, элероны, хвостовой стабилизатор и т.д. МСКСЗ делятся на лицевой слой, слой сотового наполнителя и клеевой слой. Лицевая отделочная панель изготавливается из углеродного волокна, стекловолокна и т.д.; клеевой слой — из эпоксидной смолы и т.д.; сотовый наполнитель — из алюминиевого сплава, картона и т.д. [2, 3]. В процессе эксплуатации между сотовым слоем и поверхностным слоем МСКСЗ в клеевом слое возникает нарушение целостности, а в сотовом слое сердцевины возникают скрытые дефекты с водой. Поэтому необходимо выявлять нарушение адгезии и дефекты с водой в МСКСЗ.

К распространенным методам неразрушающего контроля относятся: вихретоковый контроль, ультразвуковой контроль, радиографический контроль, контроль проникающими веществами, магнитопорошковый контроль и т.д. [4, 5]. Инфракрасная термография имеет такие преимущества, как бесконтактность, экологичность, высокая точность обнаружения, отсутствие повреждений внутренней структуры материала и широкая зона обнаружения. Она представляет собой эффективный метод неразрушающего контроля для выявления отслоений и дефектов с водой в МСКСЗ. Hu C. и др. [6] предложили метод инфракрасной термографии на основе LSTM-RNN для автоматической классификации распространенных дефектов в сотовых материалах. Tian G Y. и др. [7] производили сканирование углепластиковых панелей и сотовых сэндвич-панелей импульсным вихретоковым методом для контроля различных типов дефектов. Bernardo C.F. De Oliveira и др. [8] использовали оптическую термографию с синхронизацией фазы (ОТСФ) и оптическую зонную шерографию (ОЗШ) для определения дефектов в образцах из углепластика при низкоэнергетическом воздействии. Чулков А.О. и др. [9] исследовали метод терагерцовой (ТГц) термографии для обнаружения скрытых дефектов с водой в сотовых конструкциях. Song Z. и др. [10] исследовали дефекты типа нарушения адгезии в сотовых сэндвич-пластинах при многоугловых воздействиях, вызванных градом из льда. Wang F. и др. [11] использовали синхронную термографию для обнаружения

дефектов в сотовых сэндвич-структурах типа углерод/эпоксидная облицовка—алюминий посредством теоретических и экспериментальных исследований. Ву С. и др. [12] применили алгоритмы пульсационной нейронной сети (ПНС) для оценки дефектов в материалах из аэрокосмической отрасли. Rellinger T. и др. [13] использовали комбинацию вихретокового метода и метода лазерного сканирования для выявления ударных повреждений в сотовых сэндвич-панелях. В данном исследовании с помощью метода неразрушающего контроля импульсной инфракрасной термографии были выявлены отслоения и дефекты с водой в МСКСЗ. Данная работа организована следующим образом. Во-первых, в разделе 2 описаны эксперименты по импульсной инфракрасной термографии. Во-вторых, полученные последовательности инфракрасных изображений были обработаны с помощью методов ДТТ, МГК и ОГИ, которые представлены в разделе 3. Результаты и обсуждение представлены в разделе 4, после чего следуют выводы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Образцы

Представленные образцы сотовых панелей из армированного углеродным волокном пластика (углепластика) и алюминия (УП/Al) состояли из пяти слоев, а именно: два лицевые панели из углепластика толщиной 0,5 мм, один слой сотового заполнителя из Al толщиной 3,8 мм и два клеевых слоя (из эпоксидной смолы) толщиной 0,1 мм. Образцы МСКСЗ показаны на рис. 1. Как показано на рис. 1а, цилиндрические отверстия использовали для моделирования дефектов типа нарушения адгезии. Дефекты с водой были смоделированы путем заполнения внутренней части сотового заполнителя водой, как показано на рис. 1б. Размеры образца составляли $160 \times 120 \times 5$ мм, а сторона ячеек сотового заполнителя — 5 мм. Размеры дефектов приведены в табл. 1. Дефекты в первой линии были расположены между верхней панелью и клеевым слоем; дефекты типа нарушения адгезии во второй линии были смоделированы между клеевым слоем и слоем сотового заполнителя; наконец, дефекты в третьей линии были смоделированы между слоем сотового заполнителя и нижней панелью.

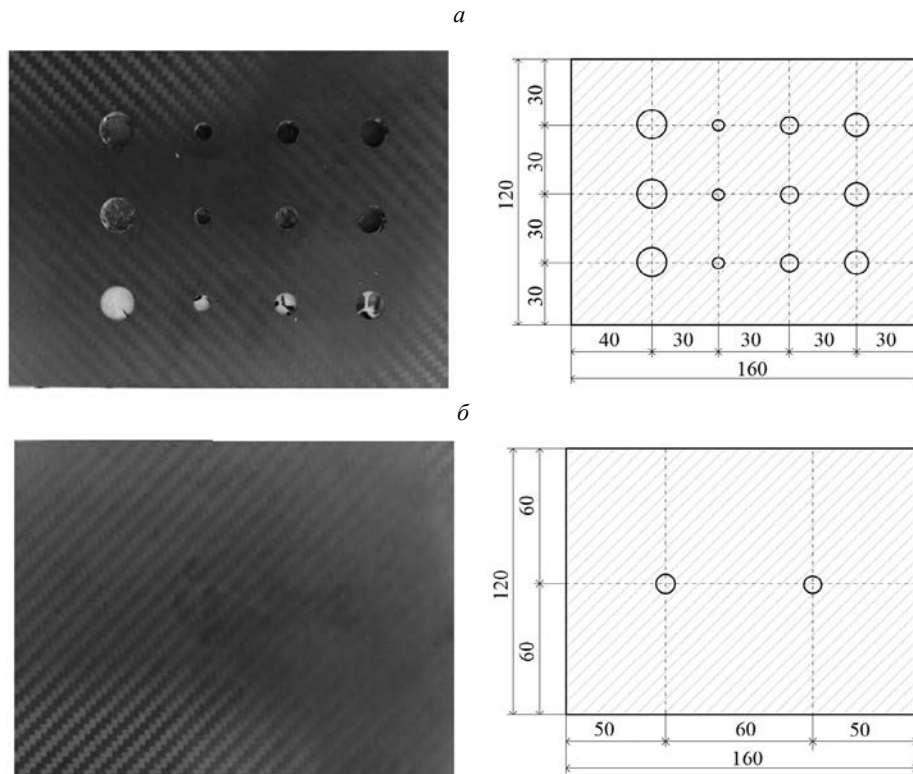


Рис. 1. Образцы, моделирующие сотовые панели с УП/Al: дефекты типа нарушение адгезии в образце 1 (а); дефекты, заполненные водой, в образце 2 (б).

Таблица 1

Размеры дефектов типа нарушение адгезии (Φ — диаметр, h — высота)

1	$\Phi = 12$ $h = 4,6$	$\Phi = 6$ $h = 4,6$	$\Phi = 8$ $h = 4,6$	$\Phi = 10$ $h = 4,6$
2	$\Phi = 12$ $h = 4,4$	$\Phi = 6$ $h = 4,4$	$\Phi = 8$ $h = 4,4$	$\Phi = 10$ $h = 4,4$
3	$\Phi = 12$ $h = 0,6$	$\Phi = 6$ $h = 0,6$	$\Phi = 8$ $h = 0,6$	$\Phi = 10$ $h = 0,6$

2.2. Схема эксперимента

Схема эксперимента по применению такого метода неразрушающего контроля, как импульсная инфракрасная термография для контроля МСКСЗ, показана на рис. 2. Импульсный сигнал генерировался компьютером, который управлял платой сбора данных; две галогенные лампы управлялись диммером, чтобы вызвать появление тепловых сигналов на поверхности образца. Тепловые сигналы, создаваемые нарушением адгезии и заполненными водой дефектами, регистрировались инфракрасной камерой FLIR A655sc, а последовательность инфракрасных изображений обрабатывалась с помощью программного обеспечения FLIR Research Studio.

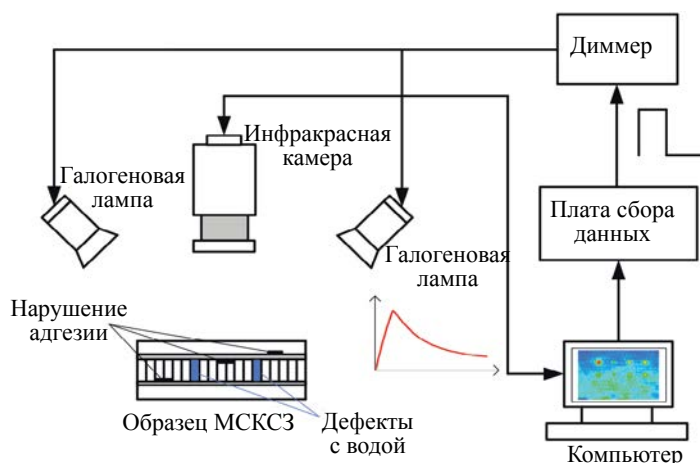
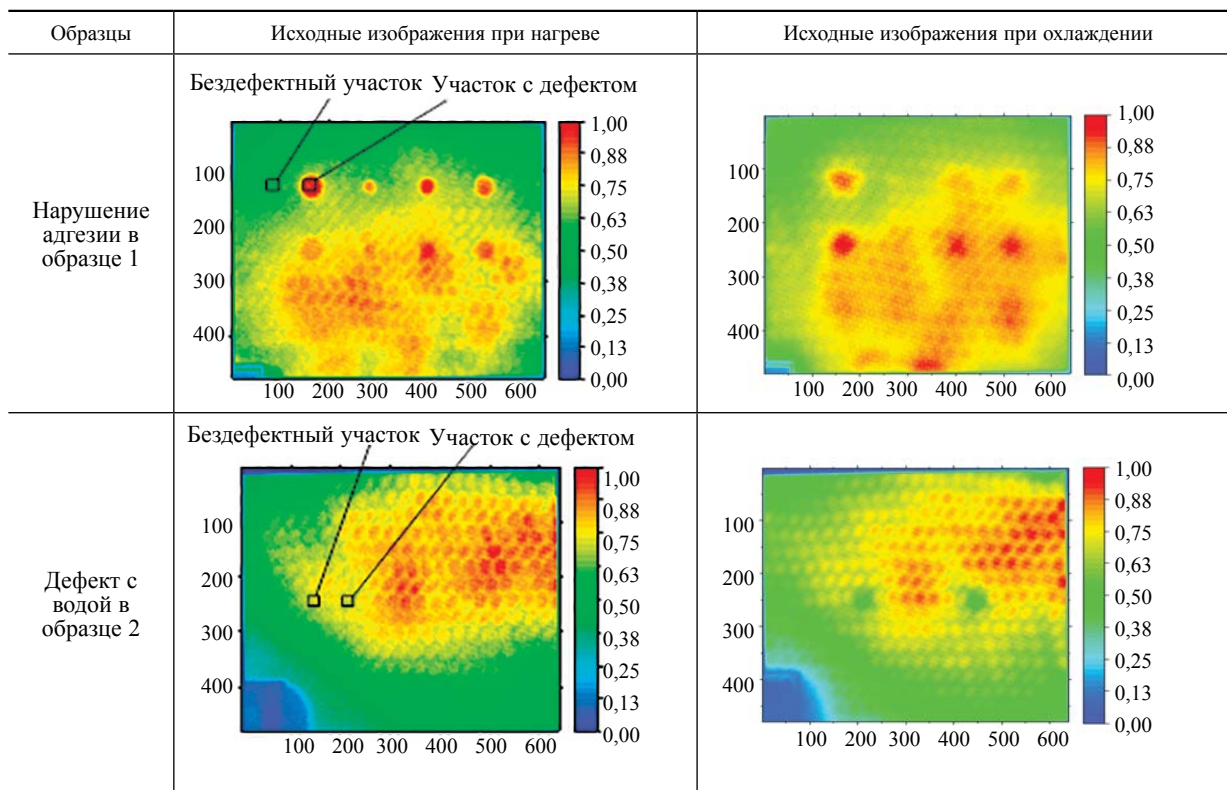


Рис. 2. Схема установки импульсной инфракрасной термографии.

2.3. Параметры эксперимента

Параметры эксперимента были следующие: мощность источника тепла 2000 Вт, длительность импульса 5 с, частота съемки 25 Гц длительностью 20 с. Расстояние между двумя образцами и инфракрасной камерой составляло 300 мм. Примеры исходных инфракрасных изображений приведены в табл. 2. Видно, что расслоения легко обнаруживаются и идентифицируются на стадии нагрева, в то время как сигналы температуры дефектов с водой лучше проявляются в процессе охлаждения. Контур дефектов на исходных изображениях в табл. 2 не очень четкие из-за шумовых помех и неравномерного нагрева. Поэтому инфракрасные изображения были обработаны с применением некоторых специальных алгоритмов для лучшей идентификации как нарушений клеевых соединений, так и дефектов воды. Перед обработкой изображений все они были нормализованы, чтобы уменьшить влияние неравномерного нагрева. Для оценки шума инфракрасных изображений было рассчитано отношение сигнал/шум (ОСШ) [14, 15].

Примеры исходных инфракрасных изображений



3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1. Динамическая тепловая томография

В классической методике динамической тепловой томографии (ДТТ) [16, 17] требуется выбор бездефектных участков. Безэталонный метод не требует выбора эталона для бездефектной области, а для выделения бездефектной области используется температурный отклик ΔT с помощью полиномов разного порядка. Каждое изображение сначала разделяется безэталонным методом для получения нового распределения сигналов. Выполнив такую операцию над значением каждого пикселя, можно получить соответствующую максиграмму.

Безэталонный алгоритм метода ДТТ использует полиномы третьего и шестого порядков. Согласно уравнению (1), каждый пиксель может быть описан созданием карт максимальных значений $\Delta T(x, y, t)$ и времен их появления:

$$\Delta T(x, y, t) = T_h(x, y, t) - T_l(x, y, t). \quad (1)$$

3.2. Метод главных компонент

Метод главных компонент (МГК) [18, 19] использовался в первую очередь для уменьшения размерности исходных данных инфракрасных изображений, тем самым уменьшая влияние посторонних шумов. МГК применялся путем ранжирования оценки кумулятивного вклада, что позволило получить инфракрасные изображения с явными признаками дефектов. Доля дисперсии главной компоненты в общей дисперсии всех наблюдаемых случайных величин (оценка вклада) рассчитывалась по матрице коэффициентов λ :

$$CRP_y = \frac{\lambda_y}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (2)$$

где CRP_y — вклад y -й главной компоненты; λ_i — собственное значение матрицы коэффициентов.

Ковариационная матрица, так же как и собственные значения λ_i , и собственный вектор B_i рассчитывались для определения оценки кумулятивного вклада, который показан в виде:

$$\sum_{y=1}^m CRP_y = \frac{\sum_{k=1}^m \lambda_k}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (3)$$

3.3. Общее гармоническое искажение

В области технологии микроэлектроники была предложена идея общего гармонического искажения (ОГИ) [20]. Типичное опытное устройство не является идеально линейным, поэтому выходной сигнал имеет дополнительные гармонические составляющие, отличные от входных температурных сигналов, что приводит к искажениям сигнала. Таким образом, ОГИ можно использовать для количественной оценки гармонических искажений в температурных сигналах. ОГИ_p определяется как отношение мощности к сумме мощностей основной частоты, что описывается формулой:

$$\text{ОГИ}_p = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} P_n}{P_1} = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}, \quad (4)$$

где P_n и V_n — мощность и напряжение N -й гармоники, при этом частота первой гармоники является основной частотой. Другой подход связан с описанием общего гармонического искажения через отношение амплитуд, определяемое как ОГИ_a, что показано в уравнении:

$$\text{ОГИ}_a = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}. \quad (5)$$

Поскольку шум всегда присутствует в инфракрасном изображении, метод ОГИ может быть использован для квантования такого шума и уменьшения вклада шума в последовательность инфракрасных изображений. ОГИ эффективно измеряет степень смещения в отклике, вызванном внутренними дефектами и бездефектной областью. Количественная оценка первой гармоники позволяет эффективно нормализовать последовательность инфракрасных изображений благодаря тому, что на соответствующие инфракрасные изображения меньше влияет излучательная способность поверхности.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температурная кривая теплового отклика показана на рис. 3. Видно, что при импульсном нагреве температура поверхности над дефектами всегда выше, чем температура бездефектной области. В результате, на стадии охлаждения температура поверхности над дефектом и температура бездефектной области постепенно достигают теплового равновесия. Кроме того, на стадии нагрева температура поверхности над дефектом, заполненным водой, остается такой же, как температура бездефектной области; а в процессе охлаждения температура над таким дефектом становится ниже, чем температура бездефектной области, соответственно скорость охлаждения заполненной водой области быстрее, чем скорость охлаждения бездефектной поверхности. Таким образом, на-

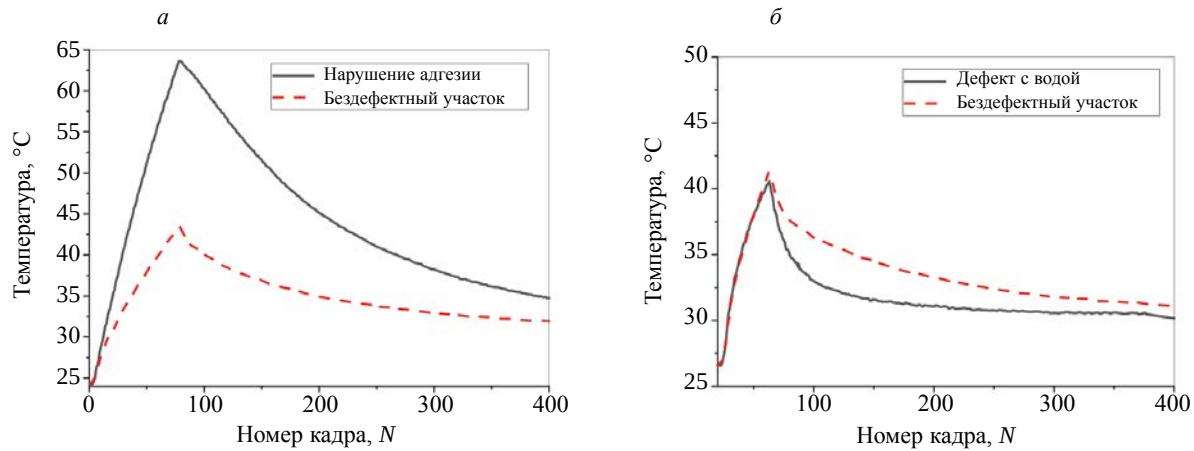


Рис. 3. Температурная кривая теплового отклика над дефектами: дефект типа нарушение адгезии в образце 1 (а); Заполненные водой дефекты в образце 2 (б).

рушения адгезии в МСКСЗ могут быть легко идентифицированы при импульсном нагреве, в то время как заполненные водой дефекты МСКСЗ становятся хорошо заметными при охлаждении.

На рис. 4 представлены результаты обработки образца 1 после нормализации. ДТТ-максиграмма показана на рис. 4а, изображение МГК—ГКЗ — на рис. 4б, а изображение ОГИ—ОГИ_р — на рис. 4в. ОСШ был улучшено благодаря применению методов МГК, ДТТ и ОГИ. После обработки ДТТ некоторые дефекты все еще остаются затененными шумом, хотя и не искаженными. МГК отфильтровывает шумовые помехи, особенно хорошо это сказывается на нарушениях адгезии. Кроме того, метод ОГИ выглядит более эффективным в случае нарушения адгезии.

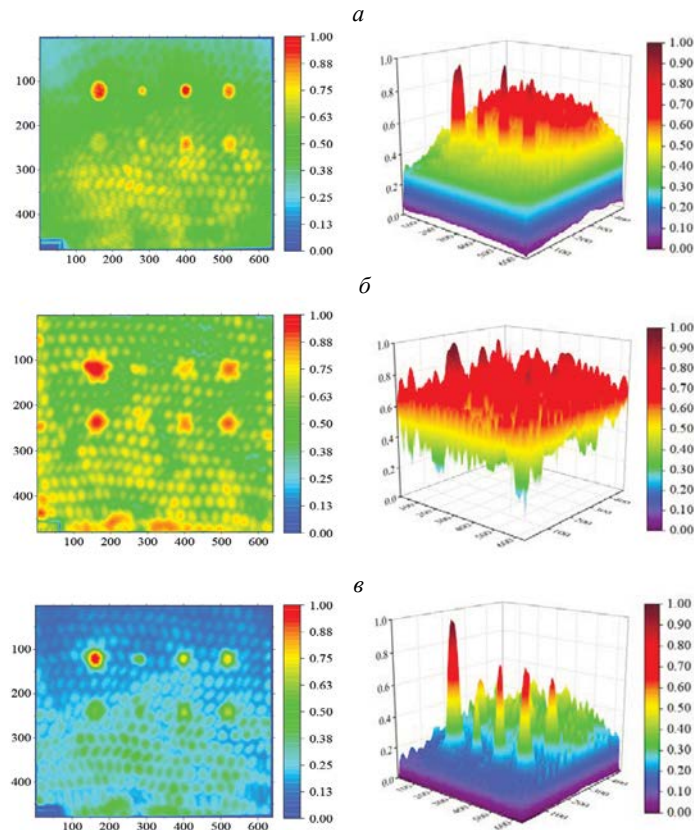


Рис. 4. Результаты обработки изображения для образца 1: результат обработки с помощью ДТТ-максиграммы (а); результат обработки с помощью ДТТ—ГКЗ (б); результат обработки с помощью ОГИ—ОГИ_р (в).

Результаты обработки образца 2 представлены на рис. 5. На рис. 5а—в показаны изображения, обработанные с помощью ДТТ-максиграммы, МГК—ГКЗ и ОГИ—ОГІ_а. Видно, что ОСШ, характерные для инфракрасных изображений, могут быть улучшены путем применения методов ДТТ, МГК и ОГИ, однако метод ДТТ оказался не идеальным для обнаружения дефектов, заполненных водой, в то время как с помощью МГК такие дефекты были четко идентифицированы. В свою очередь, метод ОГИ позволил значительно повысить контрастность инфракрасного изображения участков с водой в проинспектированной сотовой панели.

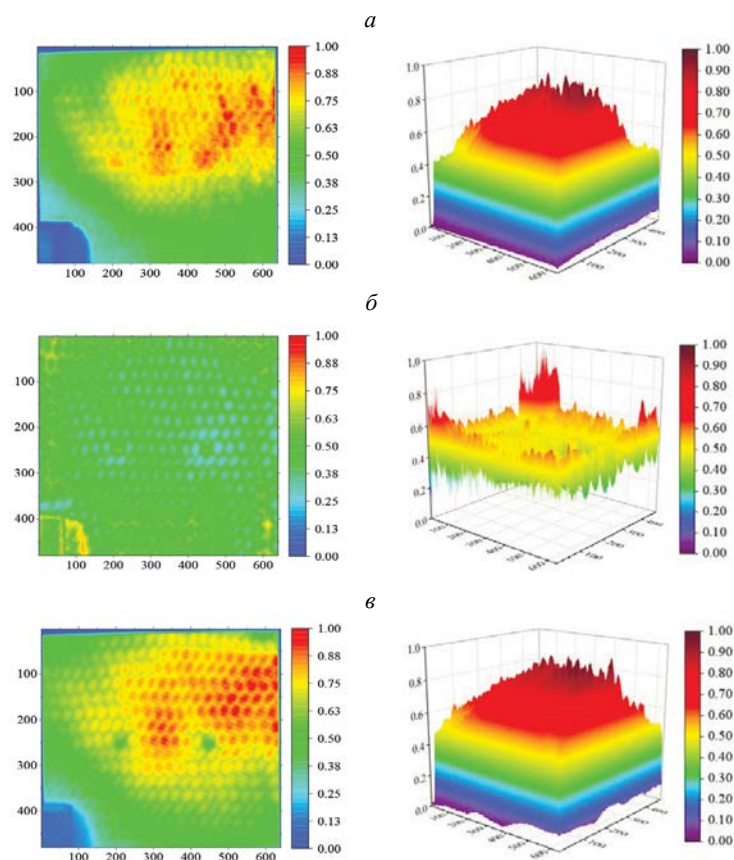


Рис. 5. Результаты обработки изображений для образца 2: результат обработки с помощью ДТТ-максиграммы (а); результат обработки с помощью ДТТ—ГКЗ (б); результат обработки с помощью ОГИ—ОГІ_а (в).

Таблица 3

Обработка инфракрасных изображений: величины ОСШ

Образцы	Исходные изображения	ДТТ	МГК	ОГИ
Образец 1	52	94	103	135
Образец 2	10	14	17	19

Значения ОСШ, полученные в результате обработки изображений, представлены в табл. 3. Видно, что исходные ИК-изображения характеризуются существенным вкладом шума, что приводит к низким значениям ОСШ. Результаты контроля были улучшены путем применения некоторых известных методов обработки данных. Было показано, что метод ДТТ, в отличие от метода МГК, не улучшает значения ОСШ, в то время как максимальные значения ОСШ при обнаружении как нарушений адгезии, так и дефектов, заполненных водой, были получены с помощью метода ОГИ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для контроля нарушений адгезии и заполненных водой дефектов в многослойных композитах с сотовым наполнителем (МСКСЗ) был исследована методика неразрушающего контроля, а именно импульсная инфракрасная термография. Было установлено, что нарушения адгезии могут быть более эффективно обнаружены на стадии нагрева, а заполненные водой ячейки сот могут быть выявлены во время охлаждения образца. Для обработки последовательностей исходных инфракрасных изображений использовались методы динамической тепловой томографии (ДТТ), метод главных компонент (МГК) и метод общего гармонического искажения (ОГИ). Результаты показали, что различимость вышеупомянутых дефектов в МСКСЗ может быть улучшена с помощью методов ДТТ, МГК и ОГИ, причем метод ОГИ является предпочтительным при контроле МСКСЗ. Соотношение сигнал/шум (ОСШ) было улучшено при применении всех использованных методов, но самые высокие значения ОСШ были получены при повторном использовании метода ОГИ. В будущем с помощью инфракрасной термографии будет исследовано большее количество дефектов в МСКСЗ, таких как ударные повреждения поверхности, лед в сотах и т.д.

Авторы благодарны Chiwi Bu за предложения по представлению рукописи, редакторам журнала и рецензентам за полезные предложения по доработке текста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu X., Li Y., Cai W. et al. Dynamic responses and energy absorption of sandwich panel with aluminium honeycomb core under ice wedge impact // *International Journal of Impact Engineering*. 2022. V. 162. P. 104137.
2. Tiska V., Chlebeek T., Hnidka J. et al. Testing of the heating element integrated into the honeycomb sandwich structure for active thermography inspection // *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2021. V. 23. No. 7. P. 3368—3389.
3. Fan T., Zou G. Influences of defects on dynamic crushing properties of functionally graded honeycomb structures // *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2015. V. 17 (3). P. 295—307.
4. Quattrocchi A., Freni F., Montanini R. Comparison between air-coupled ultrasonic testing and active thermography for defect identification in composite materials // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2019. P. 1—16.
5. He H., Zhao Y., Lu B. et al. Detection of Debonding Defects Between Radar Absorbing Material and CFRP Substrate by Microwave Thermography // *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 22.
6. Hu C., Duan Y., Liu S. et al. LSTM-RNN-based defect classification in honeycomb structures using infrared thermography // *Infrared Physics & Technology*. 2019. V. 102. P. 103032.
7. He Y., Tian G.Y., Pan M. et al. Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current // *Composites Part B: Engineering*. 2014. V. 59. P. 196—203.
8. de Oliveira Bernardo C.F., Nienheysen P., Baldo C.R. et al. Improved impact damage characterisation in CFRP specimens using the fusion of optical lock-in thermography and optical square-pulse shearography images // *NDT & E International*. 2020. V. 111. P. 102215.
9. Chulkov A.O., Gaverina L., Pradere C. et al. Water detection in honeycomb composite structures using terahertz thermography // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015. V. 51. No. 8. P. 520—523.
10. Song Z., Luong S., Whisler D. et al. Honeycomb core failure mechanism of CFRP/Nomex sandwich panel under multi-angle impact of hail ice // *International Journal of Impact Engineering*. 2021. V. 150. P. 103817.
11. Wang F., Wang Y., Liu J. et al. Theoretical and experimental study on carbon/epoxy facings-aluminum honeycomb sandwich structure using lock-in thermography // *Measurement*. 2018. V. 126. P. 110—119.
12. Bu C., Liu T., Li R., Zhao B., Tang Q. Infrared Image Segmentation Algorithm Based on Multi Structure Morphology—Pulse Coupled Neural Network in Application to the Inspection of Aerospace Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 11. P. 1018—1026.
13. Rellinger T., Underhill P.R., Krause T.W. et al. Combining eddy current, thermography and laser scanning to characterize low-velocity impact damage in aerospace composite sandwich panels // *NDT & E International*. 2021. V. 120. P. 102421.
14. Bu C., Sun Z., Tang Q. et al. Thermography sequence processing and defect edge identification of the structure debonding defects detection using long-pulsed infrared wave non-destructive testing technology // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. No. 1. P. 80—87.
15. Bu C., Liu G., Zhang X. et al. Debonding defects detection of FMLs based on long pulsed infrared thermography technique // *Infrared Physics & Technology*. 2020. V. 104. P. 103074.
16. Vavilov V.P., Kuimova M.V. Dynamic thermal tomography of composites: a comparison of reference and reference-free approaches // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38. No. 1. P. 1—13.

17. *Peng W., Wang F., Liu J.* et al. Pulse phase dynamic thermal tomography investigation on the defects of the solid-propellant missile engine cladding layer // *International Journal of Thermophysics*. 2018. V. 39. P. 1—12.
 18. *Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Shiryaev V.V., Ivanov A.I., Swiderski W.* Thermal (infrared) tomography: terminology, principal procedures, and application to nondestructive testing of composite materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2010. V. 46. No. 3. P. 151—161.
 19. *Wang F., Liu J., Song P.* et al. Multimodal optical excitation pulsed thermography: Enhanced recognize debonding defects of the solid propellant rocket motor cladding layer // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. V. 163. P. 108164.
 20. *Bu C., Li R., Liu T.* et al. Micro-crack defects detection of semiconductor Si-wafers based on Barker code laser infrared thermography // *Infrared Physics & Technology*. 2022. V. 123. P. 104160.
-