

УДК 620.179.132

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТОВ В АКТИВНОМ ТЕПЛОВОМ КОНТРОЛЕ (APPLICATION OF WAVELETS IN THE ACTIVE THERMAL INSPECTION)

В.В. Ширяев, Го Вэньцзя, Люй Цзинь
V. V. Shiryayev, Guo Wenjia, Lv Jinye

Томский политехнический университет
E-mail: shiryayev@tpu.ru

В данной работе показано, что возможно применение вейвлет-анализа для обработки последовательностей термограмм с целью повышения достоверности результатов контроля методами активного теплового неразрушающего контроля. Для вейвлет-анализа были использованы Гауссовы вейвлеты, например, вейвлет «мексиканская шляпа». Полученные после вейвлет-преобразования изображения являются очищенными от пространственных артефактов и пригодны для создания бинарных изображений дефектов, то есть, дефектных карт.

(This paper shows the possibility of using wavelet analysis of the thermal image sequences for processing, in order to improve the reliability of the results of active thermal control method for non-destructive testing. For a Gaussian wavelet, such as wavelet "Mexican hat", the obtained images avoid space structure and are suitable for creating binary image defects or defective images.)

Ключевые слова:

Активный тепловой контроль, вейвлет, стеклопластик, дефект, бинарное изображение.
(Active thermal testing, wavelet, fiberglass, defect, binary image.)

Введение

В последнее десятилетие в мире возникло и оформилось новое научное направление, связанное с так называемым вейвлет - Слово “wavelet”, являющееся переводом французского “ondelette”, означает небольшие волны, следующие друг за другом. Можно без преувеличения сказать, что вейвлеты произвели революцию в области теории и практики обработки нестационарных сигналов. В настоящее время вейвлеты широко применяются для распознавания образов; при обработке и синтезе различных сигналов, например речевых, медицинских; для изучения свойств турбулентных полей и во многих других случаях.

Вейвлеты непосредственно связаны с кратномасштабным анализом сигналов. Вейвлеты могут быть ортогональными, полуортогональными, биортогональными. Эти функции могут быть симметричными, асимметричными и несимметричными. Различают вейвлеты с компактной областью определения и не имеющие таковой. Некоторые функции имеют аналитическое выражение, другие – быстрый алгоритм вычисления связанного с ними вейвлета. Вейвлеты различаются также степенью гладкости. Для практики желательно было бы иметь ортогональные симметричные (асимметричные) вейвлеты. К сожалению, доказана теорема о том, что такими вейвлетами являются лишь вейвлеты Хаара. Функции Хаара не обладают достаточной гладкостью и не подходят для большинства приложений, поэтому для кодирования изображений обычно используют биортогональные вейвлеты.

Описание образца

Для экспериментальных исследований был изготовлен образец из стеклопластиковых пластин размером 200х300 мм. Образец представляет собой склеенные 5 слоев стеклопластика с вырезанными в некоторых слоях дефектами, толщина листа стеклопластика составляла 2 мм. Распределение дефектов показано ниже.

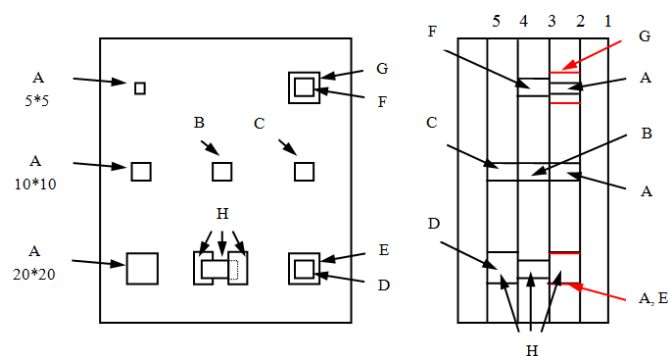


Рис. 1. Схема образца

Экспериментальные установки

Экспериментальные установки включали в себя образец, источники оптического нагрева с галогеновыми лампами мощностью 1 кВт и 30 кВт, тепловизор NEC, персональный компьютер с программой управления экспериментом и программой обработки термограмм и т.д. Установки настроены на проведение исследований при одностороннем тепловом неразрушающем контроле.

Эксперименты заключались в следующем.

Первый эксперимент. В качестве нагревателя использовалась две галогеновые лампы мощностью 1 кВт каждая. Нагрев осуществлялся 10 секунд. Запись 300 термограмм с тепловизора со скоростью 10 кадров в секунду и включение/выключение нагревателя производилось программно.

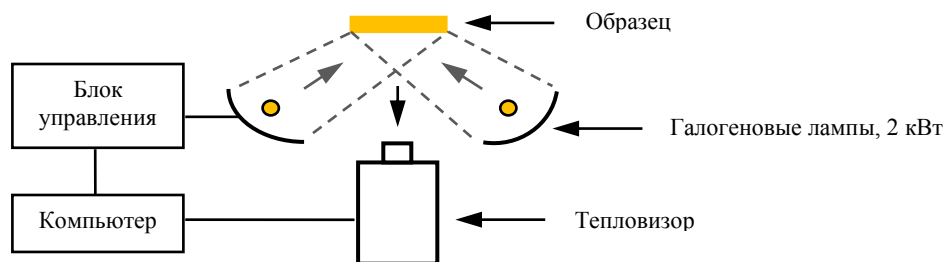


Рис. 2. Схема эксперимента с двумя 1 кВт лампами

Второй эксперимент. В качестве оптического нагревателя использовалась галогеновые лампы суммарной мощностью 30 кВт. Нагрев осуществлялся 5 секунд. Запись 350 термограмм со скоростью 10 кадров в секунду производилось программно. Управление временем нагрева с помощью кнопки включения/выключения и шторок производилось вручную.

Нагреватель в своей конструкции имеет шторки для перекрытия паразитного теплового излучения от разогретых ламп после выключения нагревателя.

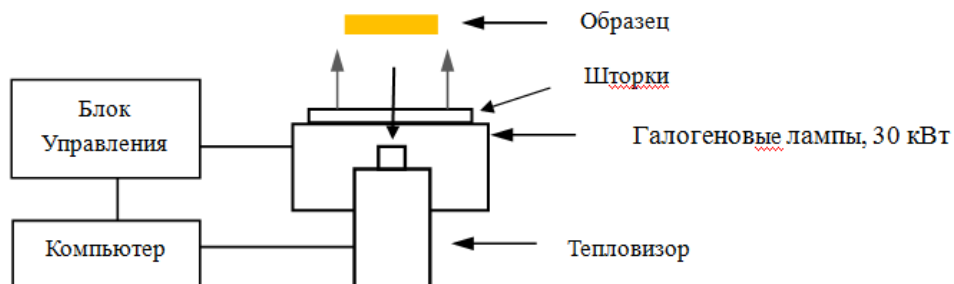


Рис. 3. Схема эксперимента с 30 кВт лампой

Общим недостатком оптических нагревов является сложность в получении равномерного по площади образца уровня нагрева. Мешающими факторами являются разное расстояние от ламп до нагреваемой поверхности образца, конструктивные особенности оптических нагревателей, неравномерность коэффициента излучения поверхности образца.

На рисунке 4 представлены термограммы для двухламповой 2-х киловатной установки и для мощного 30-ти киловатного нагревателя. В первом случае мы видим довольно равномерный нагрев образца, во втором заметны полосы более сильного нагрева. Полосы вызваны излучением нагретых панелей шторок и самими мощными лампами.

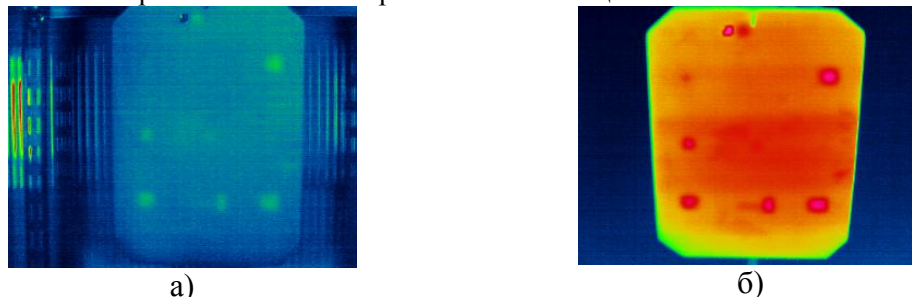


Рис. 4. Термограммы для двухламповой 2-х киловатной установки а) и для мощного 30-ти киловатного нагревателя б) Момент времени соответствует 16-й секунде остывания

Для начала применим метод главных компонент, МГК. Обычно этот метод в первой компоненте показывает самые сильные изменения температурных полей, все последующие компоненты отражают более слабые изменения, связанные с внутренними тепловыми потоками.



Рис. 5. Применение метода главных компонент к последовательности термограмм первого эксперимента, а) 1-я компонента, б) 2-я компонента

При нагреве образца в первом эксперименте в течении 10 сек 2-мя лампами по 1 кВт после применения МГК на 2-х компонентных термограммах хорошо видны дефекты слоя №2 и очень слабо проявляются дефекты слоя №3. Дефекты слоя №4 не видны. Последующие компоненты носят шумовой характер. См. рисунок 5.

Можно предположить, что все остальные методы не смогут улучшить выявляемость дефектных структур образца.

При нагреве образца во втором эксперименте в течении 5 сек 6-ю лампами по 5 кВт после применения МГК на 4-х компонентных термограммах хорошо видны дефекты слоя №2 и слабо проявляются дефекты слоя №3 на компонентной термограмме №3. Дефекты слоя №4 видны на компонентной термограмме №4. Соответствующие дефекты выделены пунктирными окружностями. Последующие компоненты носят шумовой характер. См. рисунок 6.

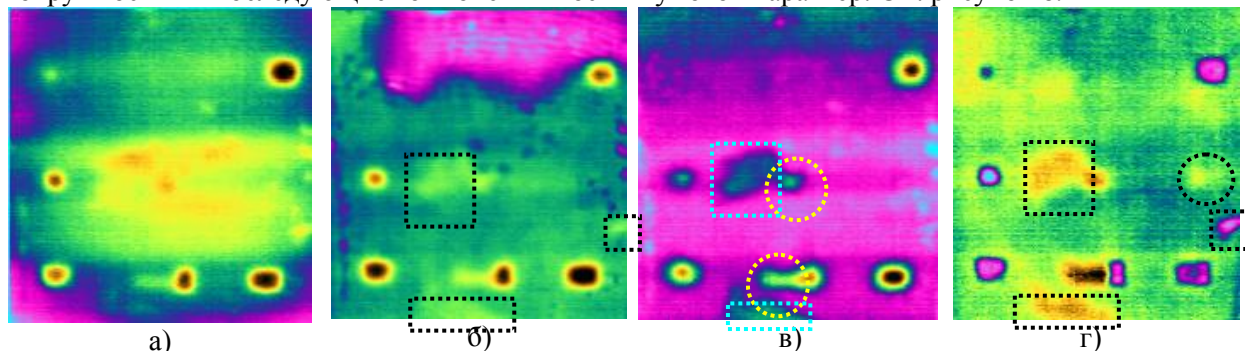


Рис. 6. Применение метода главных компонент к последовательности термограмм второго эксперимента, а) 1-я компонента, б) 2-я компонента, в) 3-я компонента, г) 4-я компонента

Этот метод на первой и второй компонентах хорошо показал неравномерность нагрева, остальные компонентные термограммы кроме дефектов показывают дополнительные структуры не заложенные изначально при изготовлении образца. Скорее всего эти структуры отражают качество склейки слоёв. Эти элементы показаны на термограммах прямоугольными пунктирными линиями.

Применение вейвлет-преобразования.

Исходя из формы изменения температуры или температурного сигнала во времени при одностороннем контроле применим вейвлеты, подобные функции Гаусса.

Непрерывное вейвлет-преобразование имеет следующий вид:

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{t_1}^{t_2} S(t) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где $S(t)$ - сигнал, а $\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ - ядро вейвлет-преобразования, a – масштаб преобразования (scale) и b – сдвиг (shift).

Принято, что масштаб связан с частотой. В случае анализа последовательностей термограмм при одномерном временном анализе масштаб может быть связан с температурным изменением, длительностью температурного сигнала. Сдвиг в нашем анализе может быть связан с появлением максимума температурного сигнала.

Имеется группа вейвлетов, основанных на функции Гаусса:

$$\phi(t) = (-1)^{n+1} \frac{d^n}{dx^n} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right),$$

где $n \geq 1$.

В нашем случае наиболее применим вейвлет МНАТ, то есть «Мексиканская шляпа», поскольку его форма похожа на температурный сигнал:

$$\phi(t) = (1 - t^2) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right).$$

В программе ThermoFit Pro имеется модуль применения вейвлет-анализа с различными вейвлетами. После генерации вейвлет-коэффициентов в программе возможно произвести восстановление термограммы на определенных условиях.

Имеется три способа восстановления, реализованные в программе ThermoFit Pro.

Первый способ восстанавливает термограмму по заданным сдвигу и масштабу. Второй способ предполагает задать диапазон масштабов при выбранном сдвиге и третий способ представляет собой синтез термограммы по вейвлет-контрасту при выбранных масштабах и сдвигах.

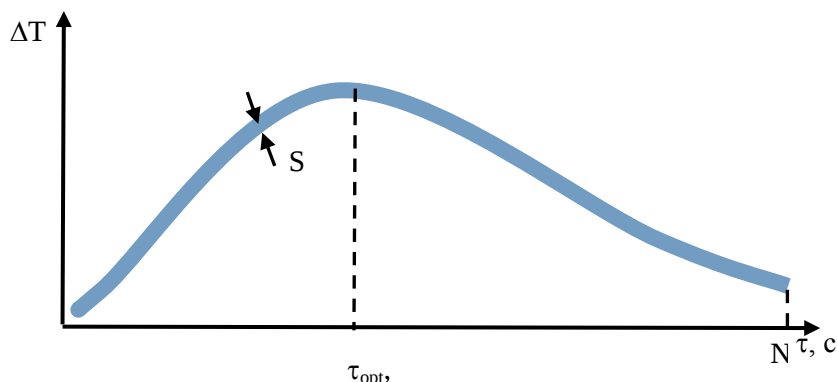


Рис. 7. Вид температурного сигнала

Выбор параметров синтеза. Момент времени появления максимума температурного сигнала $\tau_{\text{опт}}$ можно использовать для выбора параметра b . Масштаб связан с длительностью температурного сигнала. Величина масштаба может быть выбрана от размера всей последовательности N до величины превышающей уровень шума S раза в три.

Вейвлет-анализ последовательности термограмм из первого эксперимента.

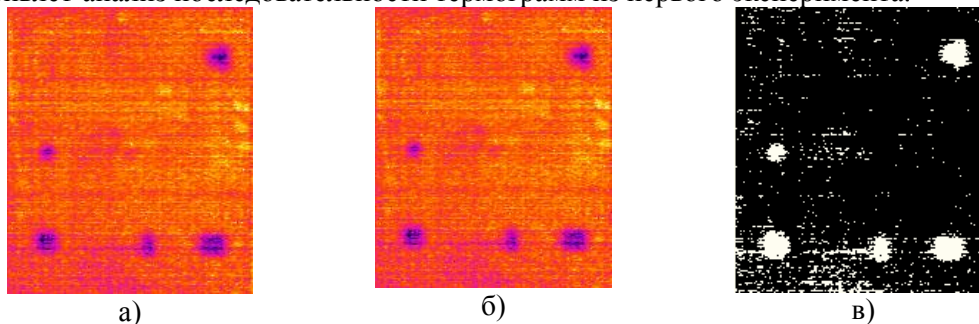


Рис. 8. Восстановленные термограммы, а) при помощи опции «Synthesis», $a = 224$, $b = 130$ (соответствует времени $\tau_{\text{opt}} = 12,8$ с и периоду, масштабу 10,3 с); б) при помощи опции «Thermogram Synthesis», a от 152 до 254, $b = 130$ (соответствует времени $\tau_{\text{opt}} = 12,8$ с и периодам от 6,9 с до 11,7 с); в) бинарная карта дефектов при $\text{SNR} = 5,93$ уровня ложной тревоги 0%

Восстановление показывает, что для синтеза термограмм и ускорения обработки достаточно работать в опции «Synthesis». Для дефекта «1» $\text{SNR} = 5,72$, для дефекта «2» $\text{SNR} = 5,93$. Применение восстановления позволило «очистить термограмму» и построить бинарную карту дефектов.

На рисунке 9 показано применение вейвлет-контраста. В этом случае наблюдаются сложности с выбором факторов a и b . Для дефекта «3» $\text{SNR} = 2,92$.

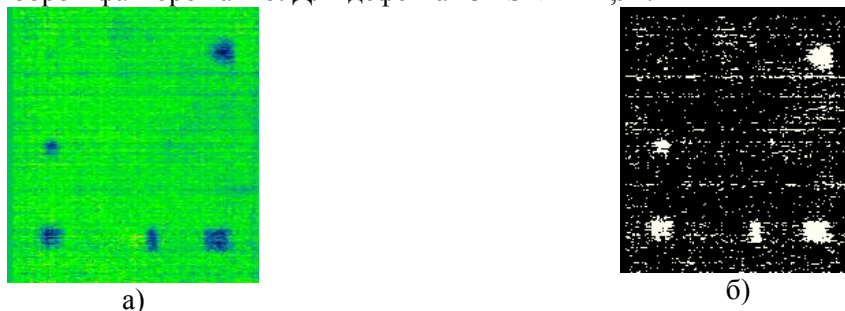


Рис. 9. Синтез термограммы а) по вейвлет-контрасту при выбранных масштабах и сдвигах $a1 = 200$, $b1 = 184$; $a2 = 128$, $b2 = 21$; б) бинарная карта при $\text{SNR} = 2,92$

Вейвлет-анализ последовательности термограмм из второго эксперимента. Обработка последовательности, полученной во втором эксперименте выполнена в том же режиме, что и обработка последовательности из первого эксперимента. Естественно, увеличение мощности нагрева уменьшает уровень флуктуационных шумов и повышает SNR .

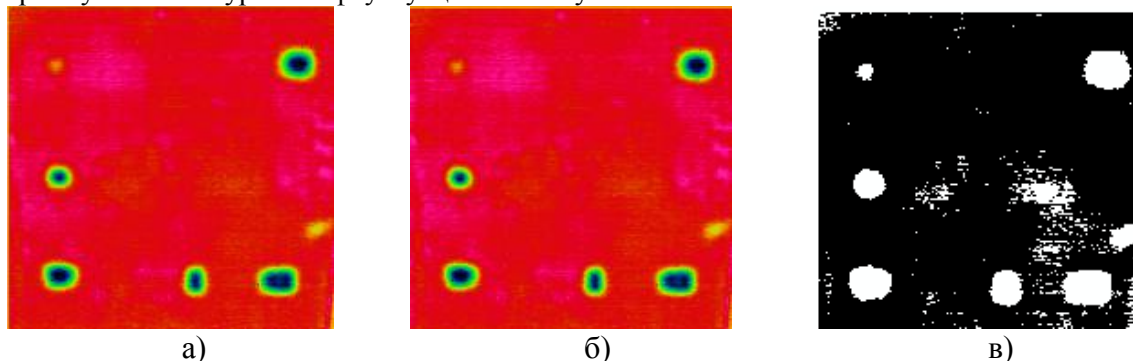


Рис. 10. Восстановленные термограммы, а) при помощи опции «Synthesis», $a = 225$, $b = 130$ (соответствует времени $\tau_{\text{opt}} = 12,8$ с и периоду, масштабу 10,35 с); б) при помощи опции «Thermogram Synthesis», a от 202 до 295, $b = 130$ (соответствует времени $\tau_{\text{opt}} = 12,8$ с и периодам от 9,29 с до 13,43 с); в) бинарное изображение дефектов (бинарная карта) при $\text{SNR} = 29,76$ и уровня ложной тревоги 0%.

Для дефекта «1» $SNR = 26,6$, для дефекта «2» $SNR = 29,76$. Применение восстановления позволило «очистить термограмму» и построить бинарную карту дефектов.

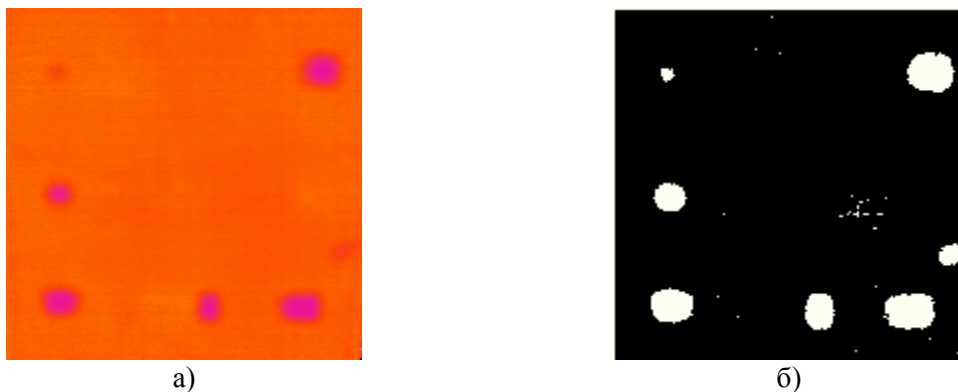


Рис. 11. Синтез термограммы а) по вейвлет-контрасту при выбранных масштабах и сдвигах $a1 = 232$, $b1 = 222$; $a2 = 188$, $b2 = 26$; б) бинарная карта при $SNR = 23,27$

Вывод.

Синтез термограмм следует производить с учетом оптимальных времён температурных сигналов и их длительностей.

Синтез термограмм позволяет выравнивать поле изображения, уменьшать число артефактов и, следовательно, позволяет строить бинарные изображения дефектов (бинарные карты).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль // М.: ИД Спектр, 2013. Издание: 2-е.— 544 с: ил. и цветная вкладка 24 с.
2. Козлов П.В., Чен Б.Б. Вейвлет-преобразование и анализ временных рядов // Вестник КРСУ, 2002. – Т2. – № 2. – С. 64—69.
3. Витязев В.В. Вейвлет -анализ временных рядов: Учеб. пособие. –СПб.: Изд-во С.-Петербург. Ун-та, 2001. – 58 с.

Сведения об авторах:

Ширяев В.В. : г. Томск, канд. техн. наук, доц., Национальный исследовательский томский политехнический университет, телефон: 8 (9138) 76-51-76, e-mail: shiryaev@tpu.ru, тепловой неразрушающий контроль.

Го Вэньцзя: г. Томск, бакалавр, Национальный исследовательский томский политехнический университет, телефон: 8 (9231) 46-06-88, e-mail: guowenjia@mail.ru.

Люй Цзинье: г.Томск, студент, Национальный исследовательский томский политехнический университет, телефон: 8 (9231) 56-27-99, e-mail: 2495355476@qq.com.