

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ В АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ ПЛАСТИКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН

© 2022 г. Ванша Кхер <sup>1,\*</sup>, Равибабу Мулависала <sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Инженерный колледж «Новый горизонт», Бангалор, Индия

<sup>2</sup>Центр датчиков, приборов и проектирования киберфизических систем, Индийский технологический институт, Дели, Индия

E-mail: \*vanshakhernhce@gmail.com; \*\*mulaveesala@sense.iitd.ac.in

Поступила в редакцию 01.02.2022; после доработки 18.02.2022

Принята к публикации 18.02.2022

Активная инфракрасная термография (АИКТ) оказалась широко используемым методом неразрушающего контроля (НК) и визуализации для определения характеристик материалов без влияния на их будущую пригодность использования. Предлагаемая работа демонстрирует оценку испытательного образца композита из армированного стекловолоконного пластика (АСВП), изготовленного с отверстиями с плоским дном в качестве дефектов на различной глубине, с использованием визуализации частотно-модулированных тепловых волн (ВЧМТВ) в качестве нового метода нестационарной визуализации тепловых волн (НСВТВ). Особенности оптимальной ВЧМТВ при сжатии импульсов особенно важны для сжатия общей наведенной тепловой энергии в узкий импульс для повышения разрешения по глубине, а также чувствительности контроля. Анализ надежности метода оптимальной ВЧМТВ при сжатии импульсов выполняется с помощью статистического параметра, известного как вероятность обнаружения (ВО). В данной работе рассматривается модель отклика непрерывного сигнала путем вычисления площади под основным центральным лепестком восстановленных профилей, полученных в процессе взаимной корреляции на всех глубинах образца из АСВП. Для статистической оценки в качестве параметров качества использовались пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) и критерий Танимото. Кроме того, была предложена схема, основанная на оценке вероятности обнаружения, с учетом площади зоны основного лепестка (ПЗОЛ) для явной видимости и разрешения дефектов. Результаты утверждают, что при применении ПЗОЛ в качестве статистического признака оценки надежности дефекты, имеющие более высокое соотношение сторон, обнаруживаются с вероятностью более 90%.

*Ключевые слова:* инфракрасная визуализация, вероятность обнаружения, пластики со стекловолокном, визуализация частотно-модулированных тепловых волн, полиномиальная аппроксимация, разрешение.

DOI: 10.31857/S0130308222050062; EDN: BMFSYK

### I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы сильно расширилось использование методов активной термографии в области НК при контроле дефектов без нарушения целостности и функциональности контролируемого объекта [1, 5]. Наиболее известными методами оптически стимулированной термографии являются: импульсная термография (ИТ), импульсная фазовая термография (ИФТ) и модулированная термография (синхронная термография(СТ)) [2, 3].

Наиболее простой в проведении процедуры АИКТ является ИТ, при которой тепловой поток в форме узкого импульса наводится в контролируемом объекте и измеряется температурный градиент в процессе охлаждения [4]. Потребность в источниках пиковой мощности, а также непостоянство температурного отклика в результате непостоянного нагрева, а также проблемы, связанные с излучательной способностью на поверхности образца, затрудняют его применение в полевых условиях. ИФТ работает по схожему с ИТ принципу с точки зрения потребности в узком импульсе высокой мощности, за тем исключением, что для выделения информации о фазе отраженного теплового отклика применяются схемы постобработки данных в виде преобразования Фурье. СТ обходит недостатки ИТ и ИФТ, поскольку он основан на применении периодического одночастотного теплового возбуждения относительно низкой пиковой мощности для получения информации о величине, а также фазе отраженных тепловых волн. Следовательно, чтобы свести к нулю такие ограничения, как требование источников высокой мощности и ограниченная глубина проникновения, применялся метод нестационарной визуализации частотно-модулированных тепловых волн (ВЧМТВ).

Основная идея линейной ВЧМТВ базируется на индуцировании тепла в образце, используя механизмы с низкой пиковой мощности путем охвата его полосой частот в зависимости от толщины (геометрии) и тепловых свойств в одном эксперименте. Как результат диффузии тепловых волн в образце, наблюдается смещение теплового градиента даже при наличии поверхностных анома-

лий. Поэтому тепловые отклики, захваченные инфракрасной камерой, в дальнейшем обрабатываются для статистической качественной оценки метода оптимальной ВЧМТВ при сжатии импульсов [10, 11]. Это может быть достигнуто по ВО-схеме, основанной на критерии площади зоны основного лепестка (ПЗОЛ), генерируемого из рассчитываемых профилей корреляции, соответствующих каждому плоскодонному отражателю (ПДО) в объекте контроля из АСВП.

ВО является общепринятой мерой для статистического обеспечения надежности контроля по методике активной инфракрасной томографии АИКТ [12—15]. Оценка вероятностей достигается двумя основными подходами: (а) либо путем использования двоичных данных (0 или 1), обозначающих наличие или отсутствие дефектов в объекте контроля; (б) либо путем получения количественного непрерывного набора экспериментальных откликов и аппроксимации их случайных распределений. В настоящей работе основное внимание уделяется оценке надежности контроля методом визуализации частотно-модулированных тепловых волн импульсного сжатия путем анализа временных профилей температуры и взаимной корреляции и, следовательно, рассмотрения пикового отношения сигнал/шум и критерия Танимото в качестве показателей надежности.

## II. ОБРАЗЦЫ И ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

При ВЧМТВ в объекте контроля находится тепловой поток, смодулированный соответствующей полосой частот с равной энергией, который необходим для контроля подповерхностных несплошностей с лучшим разрешением. Профиль распределения тепла во времени возникает как результат образования тепловых осцилляций на поверхности образца из армированного стекловолокном пластика. Согласно теории, тепловая осцилляция с угловой частотой  $\omega$ , длиной волны  $\lambda$ , где  $\lambda = 2\pi\sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$ , распространяется со скоростью  $\sqrt{2\alpha\omega}$  в материале с теплопроводностью  $\alpha$ . С увеличением глубины дефекта наблюдается экспоненциальное затухание рассеянной тепловой волны. Поскольку глубина проникновения зависит от частоты падающего излучения, следовательно, чем ниже частота, тем больше глубина проникновения, что приводит к более низкой скорости ее распространения [3].

Длина термодиффузии определяется как расстояние от поверхности, на котором энергия волны уменьшается в раз. Увеличение разрешения по глубине и облегчение одновременного зондирования различных глубин в методе визуализации частотно-модулированных тепловых волн обусловлено зависимостью длины термодиффузии от частоты развертки, а также от полосы пропускания сигнала возбуждения. В радарх используется принцип сжатия импульсов с преобладанием нестационарных сигналов для увеличения вероятности обнаружения и разрешения целевого объекта. Он фокусирует и концентрирует всю энергию падающего сигнала в одной точке. Это увеличивает пиковое отношение сигнал/шум за счет получения псевдоимпульсного отклика от входного сигнала большой длительности. В данной работе отклики теплового распределения получены в ходе проведения визуализации частотно-модулированных тепловых волн, а также реализован подход к сжатию импульсов/согласованной фильтрации на основе преобразования Гильберта. В результате будут получены коэффициенты перекрестной корреляции, а также информация о временной задержке, соответствующая распределению температуры в различных пикселях подповерхностных глубин по отношению к выбранному опорному пикселю (в основном, пикселю нефункциональной / фоновой области). Таким образом, импульсное сжатие при визуализации частотно-модулированных тепловых волн обеспечивает более глубокое зондирование подповерхностных дефектов, расположенных на различной глубине, с лучшим контрастом.

Эксперименты проводили для подтверждения работоспособности данного метода для контроля подповерхностных дефектов в композитном образце из армированного стекловолокном пластика с 13-ю ПДО, имитирующих дефекты, как показано на рис. 1а. Тепловизионная система с разрешением 320 × 256 пикселей используется для определения изменения температуры поверхности образца во времени. Фронтальный вид образца из армированного стекловолокном пластика и его термограмма показаны на рис. 1б, в. Соотношения сторон с возрастающей глубиной находятся в порядке 1,8; 2; 2,1; 2,4; 2,6; 3; 3,4; 4; 4,8; 6; 8; 12 и 24. На поверхность объекта контроля воздействуют наложенным частотно-модулированным тепловым потоком от двух галогеновых ламп по 1 кВт каждая, расположенные на расстоянии примерно одного метра от образца, как показано на рис. 1г. Временная температурная характеристика образца получена с помощью инфракрасной камеры в процессе его охлаждения с фиксированной частотой кадров 25 Гц в течение 100 с.

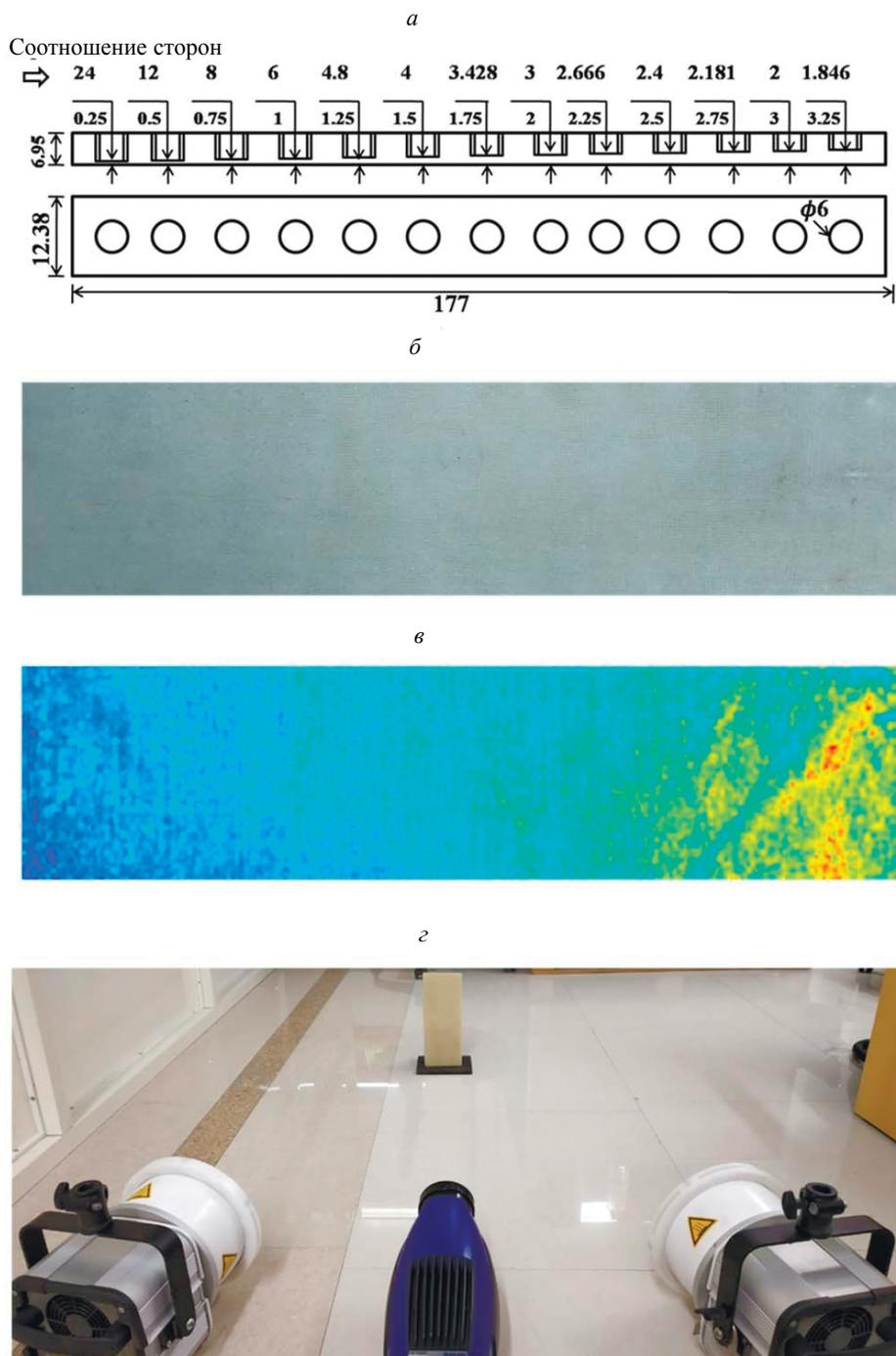


Рис. 1. Геометрическая схема объекта контроля из армированного стекловолокном пластика с искусственными ПДО (а); фронтальный вид образца (б); термограмма для фронтального вида образца из армированного стекловолокном пластика (в); внешний вид экспериментальной установки для ВЧМТВ [12] (г).

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Временные профили распределения температуры для каждой глубины образца из АСВП получают с помощью инфракрасной камеры. Временное повышение температуры, полученное для частотно-модулированного потока для конкретной глубины 0,25 мм, показано на рис. 2а. Сначала среднее повышение температуры во времени для каждого теплового профиля пикселя удаляется с помощью полиномиальной аппроксимации первого порядка. Линейный аппроксимированный временной профиль температуры для соответствующего дефекта глубиной 0,25 мм показан на рис. 2б.

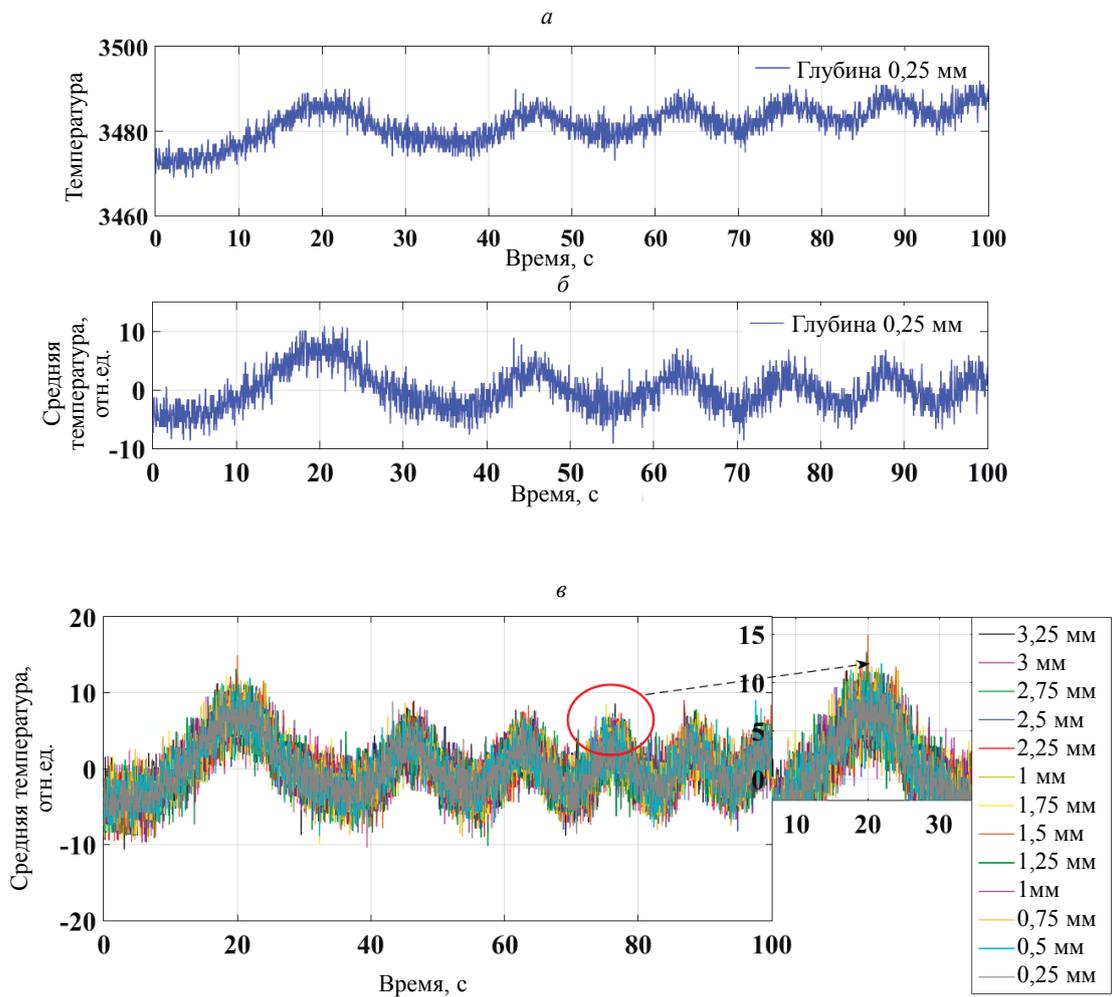


Рис. 2. Временной профиль температуры для образца из армированного стекловолокном пластика на определенной глубине 0,25 мм для теплового потока ВЧМТВ (а); его аналог (б); профили распределения среднего сигнала, полученные на испытуемом образце из армированного стекловолокном пластика в различных местах расположения дефектов (в).

Типичный средний временной температурный профиль для всех дефектов ПДО образца из АСВП показан на рис. 2в. Процесс согласованной фильтрации применяется по мере того, как временной температурный сигнал, соответствующий каждой глубине, свертывается с выбранным эталонным пикселем без дефектов/фона. Кросс-корреляционные изображения получают из амплитудного спектра результирующего свернутого сигнала. Восстановленные последовательности, полученные из профилей сжатия импульсов средних временных температурных сигналов для глубины от 0,25 до 3,25 мм для образца из АСВП, показаны на рис. 3.

Исследования по вероятности обнаружения (ВО) могут проводиться с помощью различных моделей. В текущей работе для цели оценки надежности контроля методом ВЧМТВ сжатия рассмотрены статистические модели характеристик непрерывных сигналов [14]. Оценка ВО производится при рассмотрении площади зоны основного лепестка в качестве статистического параметра для всех глубин образца из АСВ, как показано на рис. 3.

Учитывая распределение набора количественных характеристик (ПЗОЛ в данном случае), для оценки ВО выбирается и используется аппроксимирующая модель зависимости ПЗЛО от логарифма  $r$ . Далее была предложена линейная корреляция ВО на различных глубинах как функция соотношения сторон дефекта (диаметр/глубина) $r$ . Следовательно, логлинейная аппроксимирующая модель предполагает, что существует линейная корреляция между сигналом [ПЗОЛ] и соотношением сторон:

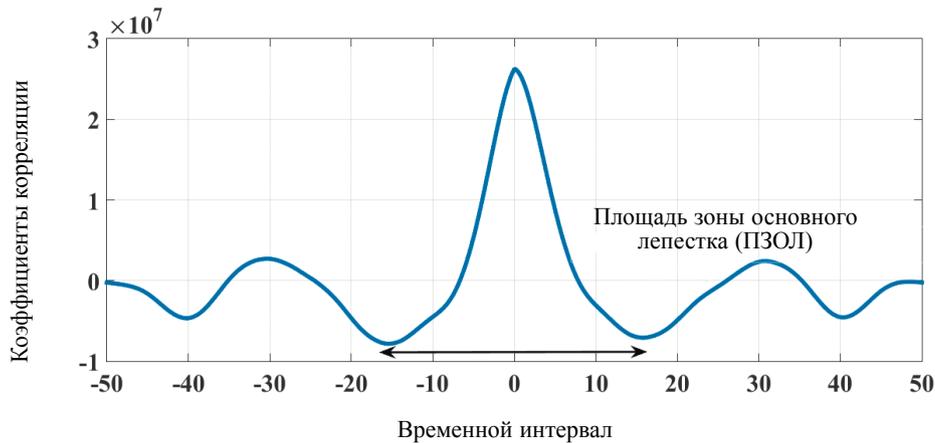


Рис. 3. Площадь зоны основного лепестка, рассчитанная из восстановленного корреляционного профиля, сгенерированного для всех глубин (см. рис. 1а—з) объекта контроля из армированного стекловолокном пластика.

$$|\text{ПЗОЛ}| = \beta' + \alpha' \log(r) + \varepsilon', \quad |\text{ПЗОЛ}| \geq |\text{ПЗОЛ}'|_{th}, \quad (1)$$

где  $\alpha'$  и  $\beta'$  представляют собой коэффициент наклона прямой и точки пересечения модели линейного приближения соответственно, а  $\varepsilon'$  — погрешность, стандартная погрешность по Гауссу в основном, с нулевой средней и постоянным среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{\varepsilon}$ . Условие обнаружения дефекта с соотношением сторон  $r$ :  $|\text{ПЗОЛ}|$  для такого отдельного дефекта должен быть больше, чем величина порога принятия решения, т.е.  $|\text{ПЗОЛ}'|_{th}$ , тогда только дефект будет «обнаружен».

Математически ВО ( $r$ ) может быть выражен, как

$$\text{ВО}(r) = \Phi\left(\frac{\log(|r|) - \mu''}{\sigma''}\right), \quad (2)$$

где

$$\mu'' = \frac{|\text{ПЗОЛ}'|_{th} - \beta'}{\alpha'}, \quad (3)$$

$$\sigma'' = \frac{\sigma_{\varepsilon}}{\alpha'}. \quad (4)$$

Здесь  $\Phi$  представляет собой кумулятивную функцию распределения. Символами  $\mu''$  и  $\sigma''$  обозначаются среднее и стандартное отклонение соответственно, чтобы достигнуть наилучшей аппроксимации на данном наборе статистических параметров, используя оценку максимального правдоподобия (ОМП), а  $\sigma_{\varepsilon}$  представляет стандартное отклонение погрешности  $\varepsilon$ . Значения ВО, соответствующие различным соотношениям сторон, перечислены в табл. 1. Оценка ВО с применением ПЗОЛ в качестве критерия продемонстрирована графически на рис. 4.

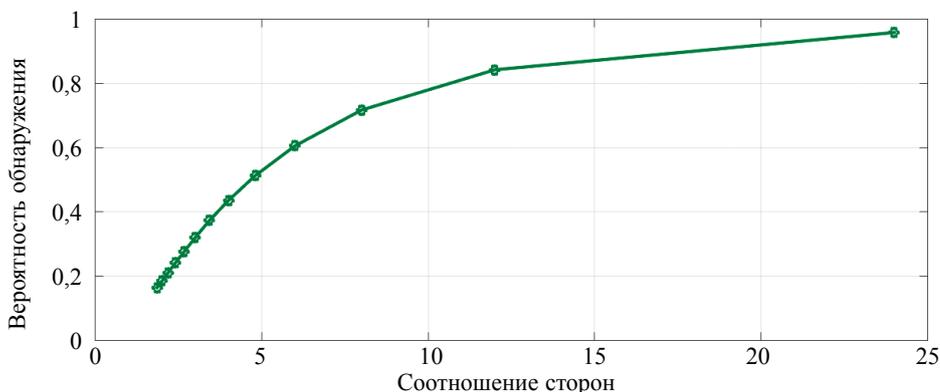


Рис. 4. Зависимость оценки вероятности обнаружения с оценкой максимального правдоподобия в качестве статистического критерия наличия дефектов в образце из армированного стекловолокном пластика от соотношения сторон.

Таблица 1

Вероятности обнаружения дефектов в сравнении с соотношением сторон для профиля глубины в образце из армированного стекловолокном пластика, используя площадь зоны основного лепестка в качестве статистического критерия

Глубины, мм	Соотношение сторон	Вероятность обнаружения
3,25	1,8	0,16
3	2	0,18
2,75	2,1	0,20
2,5	2,4	0,24
2,25	2,6	0,27
2	3	0,32
1,75	3,4	0,37
1,5	4	0,43
1,25	4,8	0,51
1	6	0,60
0,75	8	0,71
0,5	12	0,84
0,25	24	0,95

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании была разработана система оценки вероятности обнаружения, основанная на минимальном пороговом значении площади зоны основного лепестка, необходимым для максимального контраста, чтобы оценивать и улучшать эффективность обнаружения метода импульсного сжатия ВЧМТВ. Пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) и критерий Танимото были использованы в качестве показателей для статистической оценки дефектов в армированном стекловолокном пластике. Полученные результаты ВП показали, что если сжатие импульсов с помощью согласованной фильтрации обеспечивает лучшее разрешение по глубине для более глубоких дефектов, то рассмотрение ПЗОЛ как спектра полной сосредоточенной мощности в качестве критерия помогает достичь лучшей видимости и обнаруживаемости для дефектов с большим соотношением сторон. Было замечено, что дефект с наибольшим соотношением сторон (самый глубокий дефект) обнаруживается с вероятностью более 90 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hellier C.* Handbook of Nondestructive Evaluation Second Edition. McGraw-Hill Professional Publishing, USA, 2001.
2. *Bergmann R., Huke P.* Advanced Methods for optical Nondestructive Testing. Optical Imaging and Metrology / Advanced Technologies, Wiley, New Jersey. 2012. P. 393—412.
3. *Maldague X.* Theory and Practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing. Wiley, New York, 2001.
4. *Sakagami T., Kubo S.* Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative non-destructive evaluations // Infrared Physics and Technology. 2002. V. 43. No. 3—5. P. 211—218.
5. *Shepard S.M.* Introduction to active thermography for non-destructive evaluation // Anti-Corrosion Methods and Materials. 1997. V. 44. No. 4. P. 236—239.
6. *Busse G., Wu D., Karpen W.* Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography // Journal of Applied Physics. 1992. V. 71. No. 8. P. 3962—3965.
7. *Wu D., Busse G.* Lock-in thermography for Nondestructive evaluation of materials // Revue Generale de Thermique. 1998. V. 37. No. 8. P. 693—703.

8. *Almond D.P., Peng W.* Thermal imaging of composites // *Journal of Microscopy*. 2001. V. 201. No. 2. P. 163—170.
  9. *Ghali V.S., Mulaveesala R., Takei M.* Frequency-modulated thermal wave imaging for non-destructive testing of carbon fiber-reinforced plastic materials // *Measurement Science and Technology*. 2011. V. 22. No. 10. Art. No. 104018.
  10. *Mulaveesala R., Tuli S.* Implementation of frequency-modulated thermal wave imaging for non-destructive sub-surface defect detection // *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2005. V. 47. No. 4. P. 206—208.
  11. *Mulaveesala R., Tuli S.* Theory of frequency modulated thermal wave imaging for non-destructive sub-surface defect detection // *Applied Physics Letters*. 2006. V. 89. No. 19. Art. No. 191913.
  12. *Kher V., Mulaveesala R., Rani A., Arora V.* Investigations on probability of defect detection using differential filtering for pulse compression favorable frequency modulated thermal wave imaging for inspection of glass fiber reinforced polymers // *IOP SciNotes*. 2020. V. 1. No. 2. P. 024407.
  13. *Meeker W.Q., Escobar L.A.* Statistical methods for reliability data. John Wiley & Sons, New-York.
  14. *Kher V., Mulaveesala R.* Probability of defect detection in glass fibre reinforced polymers using pulse compression favorable frequency modulated thermal wave imaging // *Infrared Physics and Technology*. 2021. V. 113. P. 103616.
  15. *Arora V., Mulaveesala R., Rani A., Kher V.* et al. Infrared Image Correlation for Non-destructive Testing and Evaluation of Materials // *J. Non-destruct Eval*. 2021. V. 40. P. 75.
-