

## СИНТЕЗ ДАННЫХ АКТИВНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

© 2020 г. А.О. Чулков<sup>1,\*</sup>, В.П. Вавилов<sup>1</sup>, Д.А. Нестерук<sup>1</sup>, А.М. Бедарев<sup>1</sup>, Ш. Яркимбаев<sup>1</sup>, Б.И. Шагдыров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

\*E-mail: chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 27.05.2020; после доработки 09.06.2020

Принята к публикации 11.06.2020

Предложен комбинированный способ теплового неразрушающего контроля с использованием оптической и ультразвуковой стимуляции, путем сложения отдельных термограмм, полученных в соответствующие моменты времени. Результирующие последовательности инфракрасных термограмм обеспечивают более эффективное выявление дефектов различного типа, а также могут быть обработаны с помощью известных алгоритмов, например, термографической реконструкции сигнала, анализа главных компонент и т.п. Экспериментальные результаты получены на образце сложной формы из углепластика, имитирующем авиационные нервы, с использованием роботизированного манипулятора.

*Ключевые слова:* роботизированный тепловой контроль, композит, оптическая стимуляция, ультразвуковая стимуляция, синтез данных.

DOI: 10.31857/S0130308220070064

### ВВЕДЕНИЕ

Тепловой контроль (ТК) различных видов дефектов в композиционных материалах целесообразно проводить с использованием источников тепловой стимуляции различной физической природы. Например, для обнаружения расслоений и толщинометрии используют оптический нагрев с помощью галогенных и ксеноновых ламп [1—3]. В односторонней процедуре испытаний тепловая энергия накапливается над низкотеплопроводными дефектами большой поперечной площади, приводя к локальным температурным аномалиям значительной амплитуды на фоне общего повышения температуры объекта контроля. Для обнаружения трещин, в том числе «слипнутых», эффективна стимуляция маломощными механическими колебаниями ультразвуковой (УЗ) частоты, которые генерируют, например, с помощью магнитострикционных преобразователей — метод УЗ инфракрасной термографии (УИТ) [4—7]. Вследствие трения берегов трещин и разрывов волокон генерируется тепловая энергия, также приводящая к появлению локальных температурных сигналов, но без изменения температуры в бездефектных областях.

Комбинирование способов нагрева позволяет повысить эффективность ТК качества изделий, в особенности, сложной формы [8—10]. Тепловые дефектоскопы для комбинированного ТК могут быть размещены на роботизированных манипуляторах для проведения контроля однотипных изделий в автоматизированном режиме [11—13]. При использовании УИТ робот позволяет обеспечить надежный контакт индентора магнитострикционного преобразователя с объектом контроля, улучшая качество испытаний и обеспечивая их повторяемость, что затруднительно в ручном режиме. Контроль изделий сложной формы требует проведение УЗ стимуляции в нескольких точках, например, по пространственной сетке с определенным шагом [14]. Данные требования проведения УИТ обусловлены сложным механизмом распространения волн и их затуханием в зависимости от геометрии исследуемого объекта.

Известно комбинирование результатов оптического и ультразвукового ТК путем изменения «прозрачности» единичных синтезируемых изображений [15]. В настоящем исследовании предложен новый способ синтеза путем сложения двух последовательностей инфракрасных (ИК) изображений, полученных при оптической и УЗ стимуляции, что позволяет «суммировать» особенности проявления во времени дефектов различного вида при различных способах стимуляции.

### ОБЪЕКТ КОНТРОЛЯ

Стандартный образец сложной формы из углепластика размерами 163×281×25 мм с толщиной стенки 4,7 мм был изготовлен путем склеивания при помощи эпоксидной смолы 25-и слоев

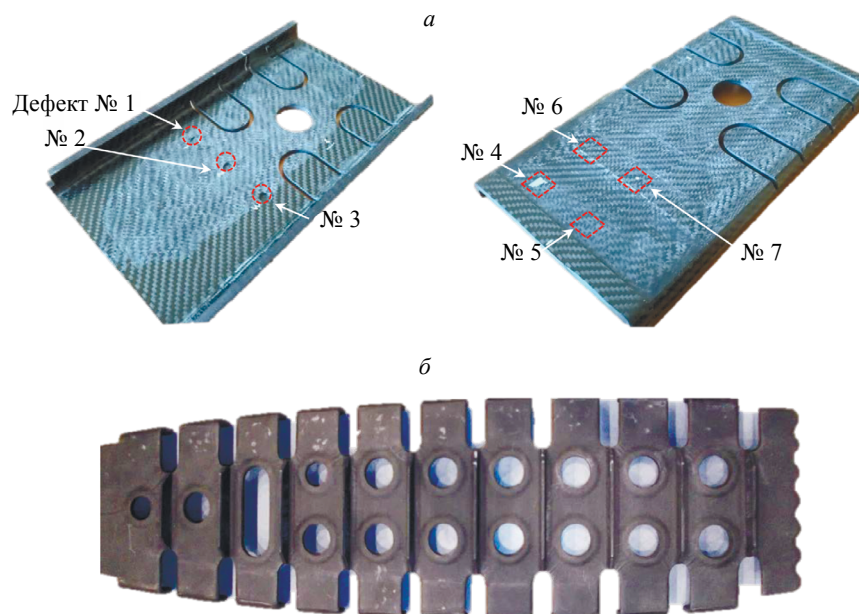


Рис. 1. Стандартный образец из углепластика (а), изготовленный из 25-и слоев углеродной ткани с элементами формы, соответствующими нервюре цельнокомпозитного самолета ТВС-2ДТС (СибНИА им. С.А. Чаплыгина) (б).

углеродной ткани (рис. 1а). Образец содержал 7 искусственных дефектов: 4 фторопластовые вставки размерами  $10 \times 10 \times 0,1$  мм, расположенные на глубине от 0,2 до 2,2 мм с шагом 0,5 мм, а также 3 зоны плоскостных утонений диаметром 10 мм и глубиной 1, 2 и 3 мм на внутренней стороне образца. В изделии было выполнено технологическое отверстие диаметром 30 мм, имитирующее отверстия с краевыми микротрещинами в реальных изделиях авиационной техники (см. рис. 1б), а также были изготовлены прорезы, имитирующие места крепления стрингеров. Поверхности стандартного образца были отфрезерованы для создания равномерной толщины его плоской части.

Пример результата УИТ нервюры рис. 1б приведен на рис. 2. Из-за сложной формы изделия контроль проводили путем ввода УЗ колебаний в 10 различных точках, после чего отдельные термограммы были сшиты в результирующее изображение. В данном изделии ряд отверстий обнаружили существенные локальные температурные сигналы в зоне краевых микротрещин, а также обширное расслоение углепластика в центре изделия.

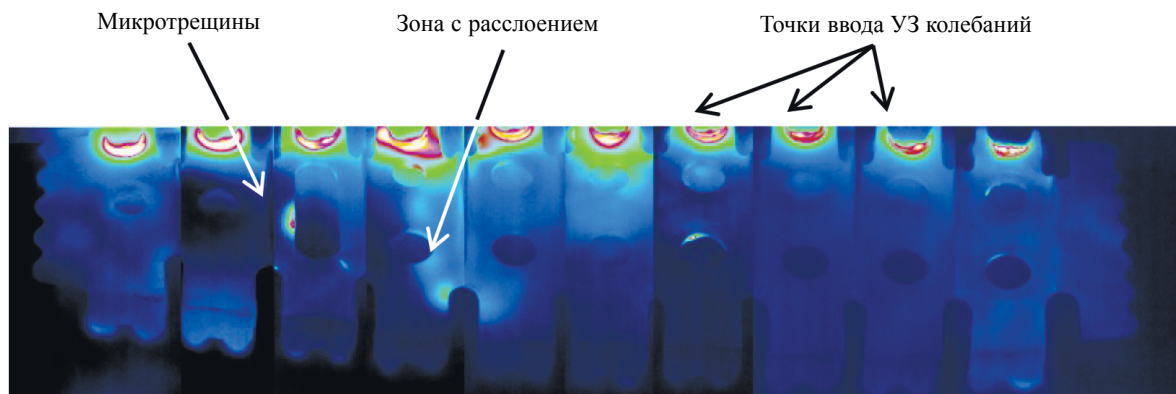


Рис. 2. Панорамная термограмма конструктивного элемента авиационной техники (нервюры) при УЗ стимуляции (адаптировано из [3]).

### СИНТЕЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как отмечено выше, новизна использованного алгоритма состоит в том, что слиянию подвергаются не отдельные изображения различной физической природы, а последовательности ИК термограмм, отражающие динамику температуры при различных видах тепловой стимуляции. Данный алгоритм был проверен путем моделирования процесса ТК изделия из углепластика толщиной 4,7 мм при использовании оптического и УЗ нагрева (теплофизические характеристики (ТФХ) материалов приведены на рис. 3). Две численные модели содержали по 7 дефектов в виде воздушных расслоений с поперечными размерами  $10 \times 10$  мм и толщиной 0,5 мкм (дефекты Д1—Д3) и 50 мкм

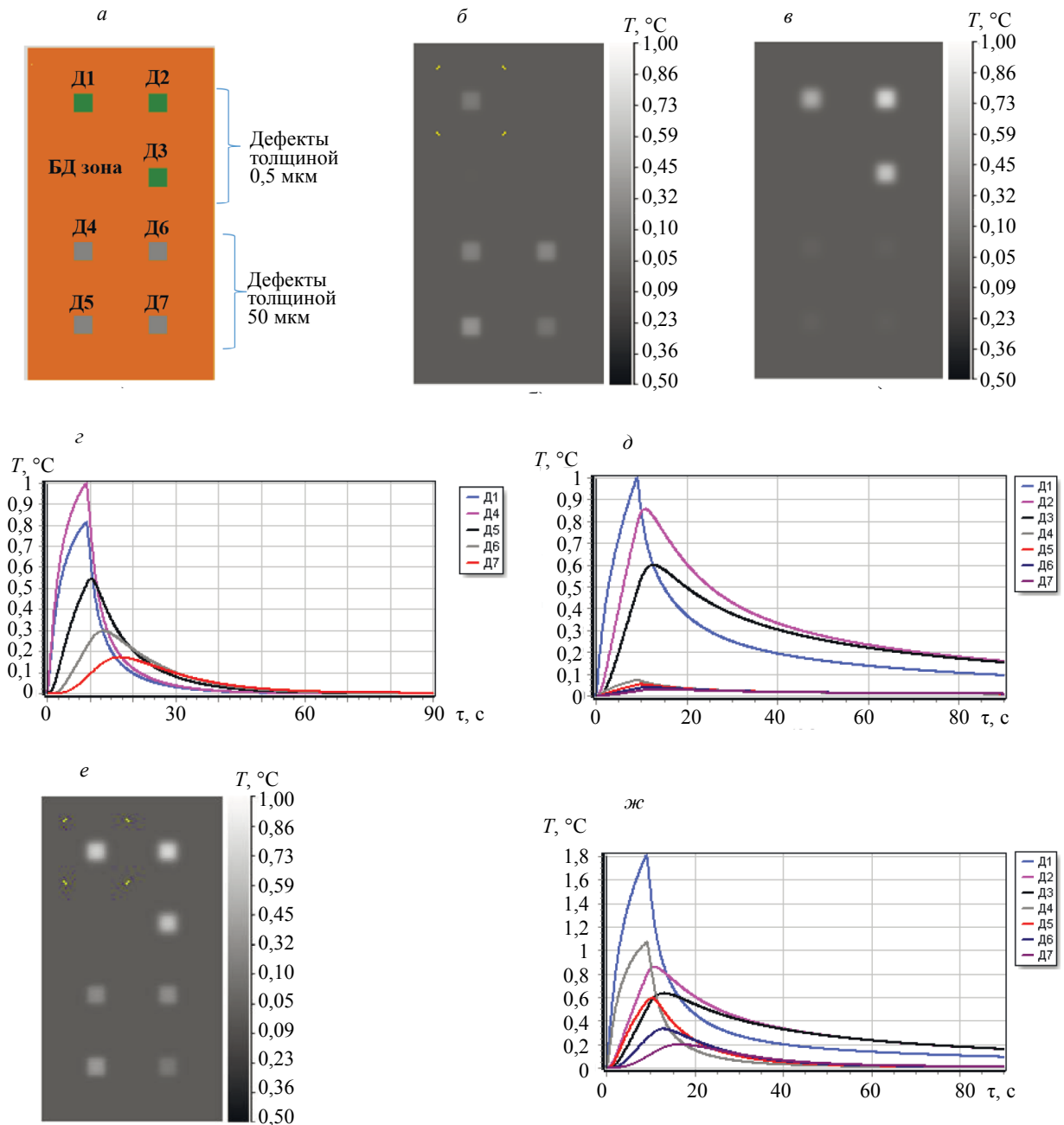


Рис. 3. Результаты моделирования ТК пластины из углепластика толщиной 4,7 мм (ТФХ углепластика: теплопроводность  $\lambda = 0,56 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ , температуропроводность  $a = 2,22 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ; ТФХ воздуха:  $\lambda = 0,07 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ;  $a = 57,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ): дефекты Д1—Д3 на глубине 0,5, 1,5 и 2 мм; Д4—Д7 на глубине 0,5—2 мм (а); термограмма при оптическом нагреве (15 с) (б); термограмма при УЗ нагреве (15 с) (в); изменение  $\Delta T$  над дефектами Д1—Д7 (оптическая стимуляция) (г); изменение  $\Delta T$  над дефектами Д1—Д7 (УЗ стимуляция) (д); синтезированная термограмма (15 с) (е); изменение  $\Delta T$  над дефектами Д1—Д7 (синтез данных) (ж).

(дефекты Д4—Д7), расположенных на различных глубинах (см. схему на рис. 3а). Классический односторонний ТК моделировали с помощью программы ThermoCalc-3D (Томский политехнический университет). В случае УЗ стимуляции расчеты были проведены с помощью программы ThermoSource (версии вышеупомянутой программы), в которой активные дефекты служат источниками тепла, мощность которых задает оператор на основе экспериментальных величин локальных температурных сигналов [16]. В обеих моделях расчетные последовательности были идентичны по пространственному разрешению, а также по временному интервалу между термограммами и количеству узлов расчетной сетки, при одинаковой длительности нагрева (9 с). Мощность оптического нагрева соответствовала мощности нагрева двумя галогенными лампами и составляла 3,8 кВт/м<sup>2</sup>. Тепловая мощность, выделяемая дефектами при УЗ нагреве, была установлена на уровне 10<sup>6</sup> Вт/м<sup>3</sup> для дефектов толщиной 0,5 мкм и 10<sup>5</sup> Вт/м<sup>3</sup> для дефектов толщиной 50 мкм. Данные оценки мощности, выделяемой дефектами, получены путем измерения избыточной температуры поверхности изделий в процессе УЗ стимуляции.

Дефекты Д1—Д3 (см. рис. 3а) имитировали трещины толщиной 0,5 мкм, которые не выявляются на глубине более 0,5 мм при оптическом нагреве вследствие низкого теплового сопротивления, однако могут быть обнаружены с помощью УЗ стимуляции за счет внутреннего трения стенок трещин. Группа дефектов Д4—Д7 имитировала скрытые расслоения толщиной 50 мкм, которые создают регистрируемые температурные сигналы при оптическом нагреве, однако не генерируют заметной тепловой энергии вследствие слабого трения.

Перед слиянием данных, полученных путем оптической и УЗ стимуляции, была осуществлена нормировка избыточной температуры изделия в диапазоне относительных значений от 0 до 1. Следует отметить, что перед нормировкой температурные данные оптического ТК были преобразованы в величины дифференциальных температурных сигналов  $\Delta T$ , которые характеризуют изменение температуры отдельных точек относительно выбранной бездефектной области. Данное преобразование позволило унифицировать характер исходных данных, полученных при тепловой стимуляции различного вида.

Обе модели (см. рис. 3 б—д) демонстрируют особенности выявления дефектов различных типов: например, расслоения толщиной 0,5 мкм (имитаторы «слипнутых дефектов») были выявлены только при УЗ нагреве. Графики на рис. 3г показывают, что дефект Д1 толщиной 0,5 мкм, расположенный на глубине 0,5 мм, создает температурный сигнал 0,81 °С (остальные дефекты из данной группы не выявляются при оптическом нагреве); дефекты Д4—Д7 толщиной 50 мкм характеризуются величинами  $\Delta T$  от 1 до 0,18 °С и временем появления максимального температурного сигнала  $\tau_m$  в интервале от 92 до 170 с. Из графиков изменения температуры при УЗ стимуляции (рис. 3д) видно, что дефекты Д1—Д3 характеризуются температурными сигналами 1,00; 0,85 и 0,60 °С, а оптимальные времена регистрации  $\tau_m$  находятся в интервале от 91 до 131 с; соответственно для дефектов Д4—Д7 температурный сигнал составляет 0,08; 0,06; 0,05 и 0,04 °С при изменении  $\tau_m$  от 91 до 137 с.

Комбинированная последовательность термограмм, полученная путем сложения температурных распределений при оптическом и УЗ способах нагрева, содержит данные о всех скрытых дефектах модели (рис. 3е), температурные сигналы которых находятся в диапазоне 0,08—1,58 °С при изменении времени наблюдения  $\tau_m$  от 91 до 161 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Испытания стандартного образца проводили с использованием галогенного нагревателя мощностью 1 кВт и ультразвукового магнитострикционного преобразователя с потребляемой мощностью 300 Вт. Для регистрации температуры использовали тепловизионный модуль Optris PI450. Запись термограмм проводили в течение 90 с с частотой 9 Гц. Фотография экспериментальной установки показана на рис. 4а.

Для обеспечения надежного и повторяемого контакта магнитостриктора с контролируемой поверхностью использовали роботизированный манипулятор KUKA Kr1100, на котором с помощью специализированного кронштейна, изготовленного на принтере Picaso 3D Designer XL [17], был закреплен магнитострикционный преобразователь (рис. 4б).

Вследствие небольших размеров изделия испытания с помощью оптического нагрева были проведены по стационарной схеме, в то время как УЗ стимуляцию осуществляли путем последовательного ввода ультразвука в 5 точек образца. Расположение точек УЗ стимуляции (рис. 4в) было определено эмпирически, причем критерием служило максимальное количество обнаруженных дефектных отметок в зоне интереса. В каждой точке ввода записывали отдельные последовательности

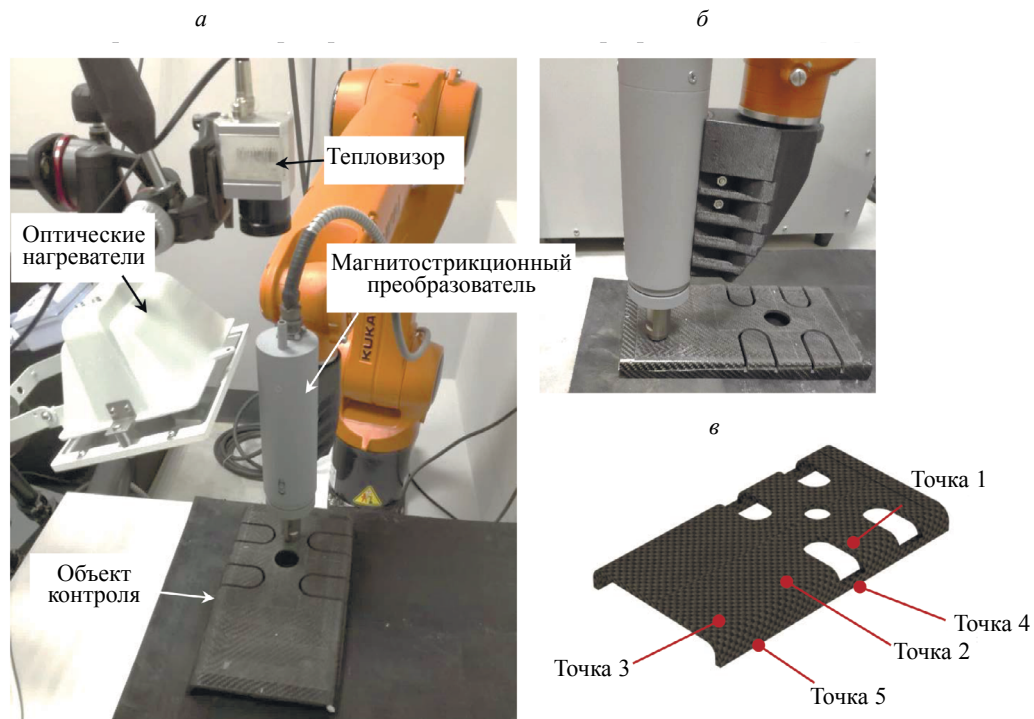


Рис. 4. Фото экспериментальной установки (а), кронштейна для размещения магнитострикционного преобразователя на роботизированном манипуляторе KUKA Kг1100 (б) и схема расположения точек ввода УЗ колебаний (в).

термограмм, причем тепловизор оставался неподвижным. Трек перемещения роботизированного манипулятора для автоматизированного ввода УЗ колебаний был создан на основе 3D-моделей образца и магнитострикционного преобразователя с помощью программы RoboDK [18].

На рис. 5 а—д приведены термограммы, полученные при УЗ стимуляции образца в точках 1 —5. Наилучше результаты были получены в точках 1, 4 и 5. Например, при УЗ стимуляции точек 1 и 4 были выявлены расслоения и растрескивания в областях пропилов, а при стимуляции точки 5 были зарегистрированы повышенные температурные сигналы над плоскородным дефектом № 2 и фторопластовыми вставками — дефектами № 4, № 5 и № 6. При вводе УЗ колебаний в точки 2 и 3 рост температуры наблюдали в местах контакта образца и резиновой подложки. В свою очередь, оптический нагрев позволил выявить плоскородные дефекты № 2 и № 3 (рис. 5е).

Первым этапом синтеза экспериментальных данных являлись нормировка и суммирование температурных значений, полученных при УЗ стимуляции объекта контроля в точках 4 и 5. Нормировку и синтез данных соответственно проводили в пределах зоны интереса на поверхности изделия, в которую не попадали точки ввода УЗ колебаний, характеризующиеся высокой температурой. Результаты ТК при вводе УЗ колебаний в точках 1—3 в синтезе не участвовали. Термограмма синтезированной последовательности при УЗ стимуляции с выявленными искусственными дефектами Д2, Д4—Д6, а также естественными дефектами в виде растрескиваний в зонах пропилов, приведена на рис. 5ж. Суммирование последовательности, синтезированной только по результатам УЗ стимуляции, с результатами оптического ТК (которые были преобразованы в величины  $\Delta T$  и далее нормированы) позволило улучшить визуальное распознавание дефектов Д2, Д3 (см. рис. 5з), однако дефекты № 1 и № 6 выявлены не были. Выявление данных дефектов было обеспечено в результате применения к синтезированным последовательностям методов термографической реконструкции сигнала (TSR) [19] и анализа главных компонент (PCA) [20] (рис. 5и, к). В то же время обработка данным методом PCA подчеркнула наличие стоячих волн, вызванных УЗ стимуляцией точки 5 (см. светлые горизонтальные полосы на термограмме рис. 5к).

Таким образом, был проведен комплексный ТК изделия сложной формы, при котором были выявлены искусственные и естественные дефекты. Использование роботизированной техники позволило автоматизировать процедуру испытаний. Синтез результатов ТК методом суммирования последовательностей позволяет проводить обработку результирующей последовательности различными алгоритмами для осуществления автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии.



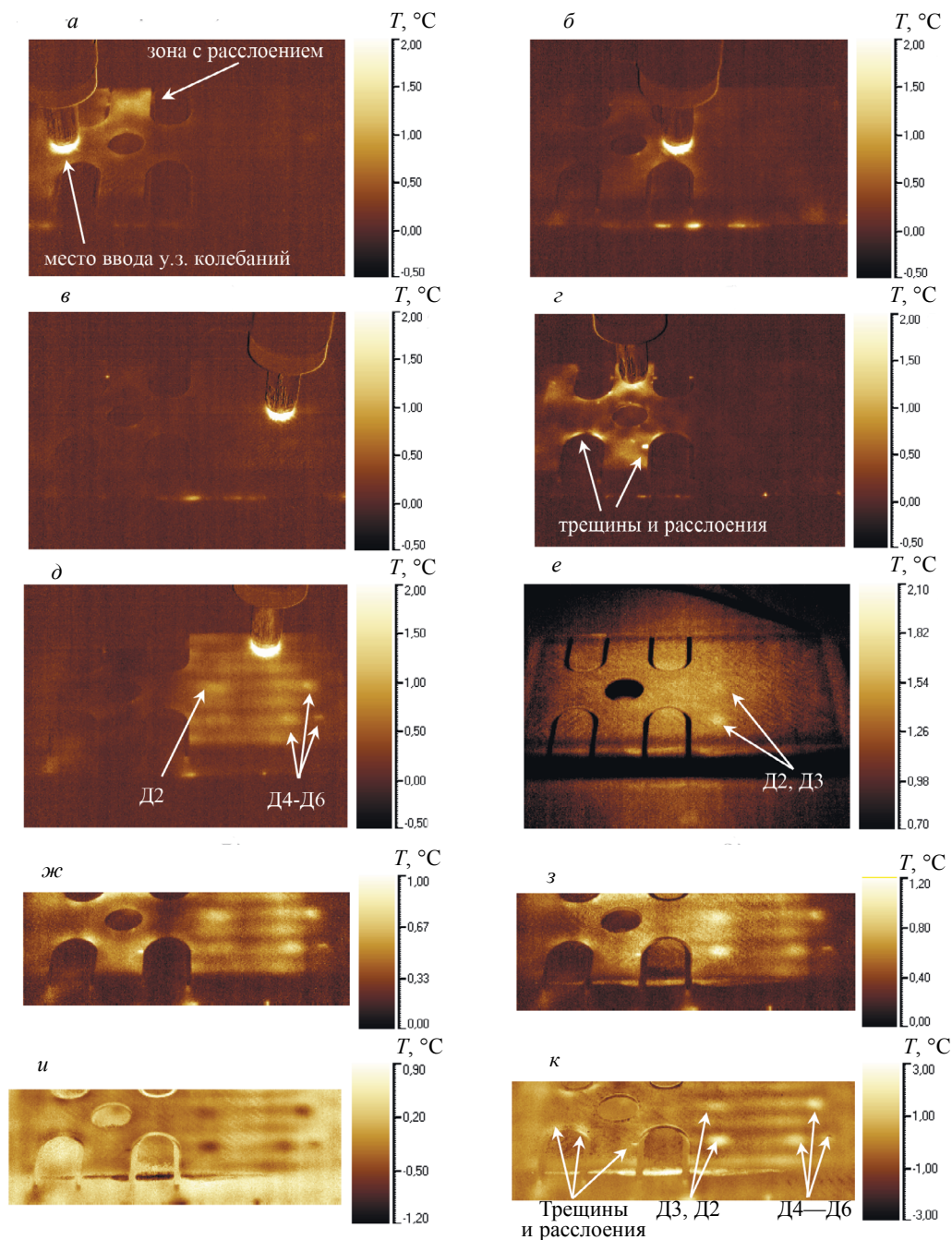


Рис. 5. Результаты ТК стандартного образца при УЗ и оптической стимуляции и синтез данных: *а* — УЗ стимуляция в точке 1 (15 с); *б* — УЗ стимуляция в точке 2 (15 с); *в* — УЗ стимуляция в точке 3 (15 с); *г* — УЗ стимуляция в точке 4 (15 с); *д* — УЗ стимуляция в точке 5 (15 с); *е* — оптическая стимуляция (20 с); *ж* — синтез термограмм в точках 4 и 5 (15 с); *з* — синтез термограмм (*е*) и (*ж*); *и* — термограмма (*з*), обработка методом TSR; *к* — термограмма (*з*), обработка методом PCA (2-я компонента).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании продолжена разработка комбинированного метода теплового неразрушающего контроля композитов с дефектами различного типа при использовании оптической и УЗ стимуляции. Предложенный подход основан на том, что выявление дефектов селективно в зависимости от типа тепловой стимуляции. Классический односторонний тепловой контроль эффективно выявляет расслоения сравнительно большой площади, расположенные параллельно лицевой поверхности объекта контроля на глубинах до нескольких миллиметров. Однако такой метод неэффективен в случае трещин с малым раскрытием, обладающих низким тепловым сопротивлением.

Соответственно, УЗ стимуляция обеспечивает существенное внутреннее трение в дефектах с соприкасающимися краями («слипнутых» дефектах), в результате чего возникают локальные температурные сигналы значительной амплитуды. Предложено комбинировать последовательности ИК термограмм, полученные с использованием указанных видов тепловой стимуляции, путем сложения отдельных изображений, записанных в одни и те же моменты времени. Результирующие последовательности обеспечивают более эффективное выявление дефектов различного типа, а также могут быть обработаны с помощью известных алгоритмов, например, термографической реконструкции сигнала, анализа главных компонент и др. Экспериментальные результаты были получены на образце сложной формы из углепластика, имитирующем авиационные нервюры, с использованием роботизированного манипулятора. В дальнейшем предполагается использовать данный подход для осуществления дефектоскопии и дефектометрии с использованием нейронных сетей.

Алгоритм синтеза данных разработан и реализован в рамках гранта Российского научного фонда №19-79-00049.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yang R., He Y.* Optically and non-optically excited thermography for composites: A review // *Infrared Physics and Technology*. 2016. V. 75. P. 26—50. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.12.026\
2. *Rahammer M., Vetter D., Kreuzbruck M.* Optical excitation thermography with VCSEL-array source // *Quantitative InfraRed Thermography*. 2016. DOI:10.21611/qirt.2016.104
3. *Pickering S., Almond D.-P.* Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography // *NDT & E Int.* 2008. V. 41. P. 501—509.
4. *Pracht M., Swiderski W.* Detection of defects in multi-layered aramid composites by ultrasonic IR thermography // *Proceedings of the SPIE*. 2017. V. 10433. id. 1043303. P. 1—6. DOI: 10.1117/12.2277110
5. *Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A.* IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. 2014. V. 9105. Article number 91050J. P. 1—7. DOI: 10.1117/12.2049810
6. *Malfense Fierro G.P., Ginzburg D., Ciampa F., Meo M.* Imaging of Barely Visible Impact Damage on a Complex Composite Stiffened Panel Using a Nonlinear Ultrasound Stimulated Thermography Approach // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2017. V. 36. Article number: 69. DOI: 10.1007/s10921-017-0449-x
7. *Lu J.* et al. Study of the effect of crack closure in sonic infrared imaging // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2007. V. 22. P. 127—135. DOI: 10.1080/10589750701448175
8. *Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A., Serioznov A.N., Bragin A.A.* Inspecting aviation composites at the stage of airplane manufacturing by applying ‘classical’ active thermal NDT, ultrasonic thermography and laser vibrometry // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. 2018. Article number 10661. P. 1—7. DOI: 10.1117/12.2304706
9. *Ciampa F., Mahmoodi P., Pinto F., Meo M.* Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components // *Sensors*. 2018. V. 18. Article number 609. DOI: 10.3390/s18020609
10. *Duana Y.* et al. Reliability assessment of pulsed thermography and ultrasonic testing for impact damage of CFRP panels // *NDT and E International*. 2019. V. 102. P. 77—83.
11. *Чулков А. О., Нестерук Д. А., Вавилов В. П., Шильников Г. В., Перепелица А. А., Щепелин В. Я.* Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль крупногабаритных изделий // *В мире неразрушающего контроля*. 2020. Т. 23. № 1. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-54-57
12. *Ribbens B.* et al. 4D Active and passive thermography measurement system using a KUKA KR16 robot and time-of-flight imaging // *Quantitative InfraRed Thermography*. 2016. DOI:10.21611/qirt.2016.106
13. <https://blog.applus.com/material-evaluation-using-infrared-active-thermography/>
14. *Vavilov V.P., Karabutov A.A., Chulkov A.O., Cherepetskaya E.B., Mironova E.A.* Comparative study of active infrared thermography, ultrasonic laser vibrometry and laser ultrasonics in application to the inspection of graphite/epoxy composite parts // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2019. В печати. DOI: 10.1080/17686733.2019.1646971
15. *Balageas D.* et al. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2016. V. 35:18. P. 1—18.
16. *Umar M.Z., Vavilov V.P., Abdullah H., Ariffin A.K.* Detecting low-energy impact damages in carbon-carbon composites by ultrasonic infrared thermography // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. V. 53. P. 530—538. DOI 10.1134/S1061830917070099
17. <https://top3dshop.ru/>
18. <https://robodk.com/>
19. *Shepard S.M., Lhota J.R., Rubadeux B.A., Wang D., Ahmed T.* Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences // *Opt. Eng.* 2003. V. 42. P. 1337—1342.
20. *Rajic N.* Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures // *Composite Structures*. 2002. V. 58 (4). P. 521—528.