

## СИНТЕЗ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИЧЕСКОГО И ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. Д.О. Долматов<sup>1,\*</sup>, А.О. Чулков<sup>1,\*\*</sup>, Д.А. Нестерук<sup>1,\*\*\*</sup>, Е.Б. Кашкаров<sup>1,\*\*\*\*</sup>,  
В.П. Вавилов<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30  
E-mail: \*dolmatovdo@tpu.ru; \*\*chulkovao@tpu.ru; \*\*\*nden@tpu.ru;  
\*\*\*\*ebk@tpu.ru; \*\*\*\*\*vavilov@tpu.ru

Поступила в редакцию 16.09.2024; после доработки 03.10.2024  
Принята к публикации 04.10.2024

Неразрушающий контроль является неотъемлемой частью контроля качества ответственных изделий. Сложная структура металлополимерных водородных баллонов затрудняет надежное выявление дефектов с применением одного вида дефектоскопии. В этой связи представляет интерес применение комбинированного неразрушающего контроля. В данной работе рассмотрено совместное использование акустической и тепловой дефектоскопии с синтезом их результатов. Проведенная экспериментальная верификация показала, что разработанная методика синтеза данных акустического и теплового контроля обеспечила повышение выявляемости дефектов по сравнению с раздельным использованием указанных видов неразрушающего контроля.

**Ключевые слова:** акустический неразрушающий контроль, тепловой неразрушающий контроль, синтез данных неразрушающего контроля, металлополимерные композитные материалы, водородные баллоны.

## DATA FUSION OF ULTRASONIC AND THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING OF METAL-POLYMER COMPOSITE

© 2024 D.O. Dolmatov<sup>1,\*</sup>, A.O. Chulkov<sup>1,\*\*</sup>, D.A. Nesteruk<sup>1,\*\*\*</sup>, E.B. Kashkarov<sup>1,\*\*\*\*</sup>,  
V.P. Vavilov<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634050 Tomsk, 30 Lenin Ave.  
E-mail: \*dolmatovdo@tpu.ru; \*\*chulkovao@tpu.ru; \*\*\*nden@tpu.ru;  
\*\*\*\*ebk@tpu.ru; \*\*\*\*\*vavilov@tpu.ru

Non-destructive testing is an integral part of quality inspection for critical products. The complex structure of metal-polymer hydrogen cylinders makes it difficult to reliably detect defects using a single type of an NDT technique. In this context, the application of hybrid NDT is of interest. This paper considers the combined use of acoustic and thermal techniques of defect detection and the fusion of their results. Experimental verification has shown that the fusion of thermal and acoustic inspection data using the approach developed in this study provides an increase in defect detection compared to the separate use of these types of NDT methods.

**Keywords:** acoustic nondestructive testing, thermal nondestructive testing, nondestructive testing data synthesis, metal-polymer composite materials, hydrogen cylinders.

DOI: 10.31857/S0130308224110051

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день водородные системы считаются одними из наиболее перспективных видов альтернативных источников энергии по причине их гибкости и эффективности преобразования энергии [1]. Одной из наиболее серьезных проблем обеспечения безопасности подобных систем является хранение водорода, что связано с его высокой летучестью и высокой взрывоопасностью в смеси с воздухом. При этом баллоны, применяемые для хранения водорода, должны обладать высокими прочностными свойствами в сочетании с высокими рабочими давлениями. Этим требованиям в полной мере соответствуют металлополимерные баллоны, которые относятся к баллонам III-го типа [2]. При производстве подобных баллонов применяют тонкостенную металлическую оболочку (лейнер) из алюминия или нержавеющей стали, которая армируется намоткой из углеволокна и связующим составом на основе эпок-сидной смолы [3].

Контроль качества водородных баллонов на этапе их изготовления является одной из важнейших составляющих обеспечения безопасности их эксплуатации. В настоящее время для этого преимущественно применяют гидравлические испытания готовых баллонов на разрушение и циклическую долговечность [4]. Однако такая процедура обеспечивает получение ограни-

ченного объема информации о дефектности композитной обмотки баллона, поэтому представляет интерес замена гидравлических испытаний методами неразрушающего контроля (НК).

К применяемым методам неразрушающего контроля предъявляют ряд требований. Прежде всего, они должны обладать высокой чувствительностью к характерным дефектам контролируемых материалов и изделий, обеспечивать высокую производительность испытаний и применяться на различных этапах изготовления изделий. Результаты контроля должны обладать высокой информативностью и достоверностью, а средства контроля должны быть доступными и надежными. Вышеуказанным требованиям в значительной степени соответствуют тепловой и акустический неразрушающий контроль, который широко применяется для испытаний композитных материалов [5]. Тем не менее любой вид контроля имеет свои ограничения и обеспечивает получение ограниченного набора данных о дефектности контролируемого изделия. Кроме того, дополнительные проблемы накладывает сложная структура металлополимерных баллонов, а также односторонний доступ к их поверхности. Поэтому интерес представляет комбинированный (гибридный) контроль, включающий применение акустической и тепловой дефектоскопии с последующим синтезом полученных результатов.

С активным внедрением в неразрушающий контроль цифровых технологий решение задачи синтеза данных, полученных с применением различных видов дефектоскопии, представляет существенный научный и практический интерес [6]. В первую очередь для повышения качества результатов контроля синтезу могут подвергаться данные, полученные с применением одного вида дефектоскопии, но в различных процедурах испытаний. Например, в работе [7] рассмотрен синтез результатов инфракрасной (ИК) термографии, полученных с использованием оптической и ультразвуковой (УЗ) стимуляции объекта контроля из углепластика. Для осуществления синтеза различных результатов теплового контроля их представляют в виде двухмерных изображений и затем попиксельно суммируют для получения общего результата. В работе [8] рассмотрен синтез данных при проведении акустического контроля с использованием технологии цифровой фокусировки антенной [9]. При вводе УЗ волн с применением наклонных призм происходит многократные отражения этих волн от границ объекта контроля и преобразование типа волны [10]. Таким образом, цифровая когерентная обработка может осуществляться для различных типов волн, которые распространяются по различным траекториям. В этой связи могут быть получены несколько изображений внутренней структуры контролируемого объекта. Для синтеза подобных изображений в работе [8] предложено использовать подход, который основан на применении согласованного фильтра.

Кроме того, синтезу могут подвергаться данные, полученные с использованием различных видов неразрушающего контроля. В работе [11] рассмотрена технология синтеза данных акустической и тепловой дефектоскопии для контроля процесса лазерного аддитивного производства металлических изделий. При этом синтез данных осуществлялся с применением архитектуры сверхточной нейронной сети U-Net. В работе [12] рассмотрен синтез данных теплового и акустического контроля изделий из алюминиевых сплавов с использованием алгоритма, который основан на использовании метода главных компонент. В результате применения подобного подхода было обеспечено эффективное выявление приповерхностных дефектов за счет использования теплового контроля, а также дефектов в объеме контролируемых изделий за счет применения эхометода акустического контроля. В рамках дефектоскопии композитных материалов синтез данных акустического и теплового контроля был рассмотрен для контроля качества склейки полимерных композитов и металлов [13, 14]. В данных исследованиях использовали автоматизированный акустический контроль с применением эхометода, а тепловой контроль осуществляли методом ИК-термографии. Результатами, полученными с использованием каждого вида контроля, являлись двухмерные изображения структуры клеевого соединения полимерный композит — металл, которые использовали для последующего синтеза. В вышеуказанных работах показана эффективность различных подходов по синтезу данных. Рассматриваются как самые простые алгоритмы, например, основанные на усреднении данных, полученных с использованием акустического и теплового контроля, так и более сложные подходы, например, основанные на использовании теории Демпстера—Шефера [15].

Характерными дефектами композитной обмотки металлокомпозитных баллонов являются расслоения, рыхлоты и трещины, которые могут находиться на границе между металлическим слоем и композитом, а также между слоями композитной обмотки [16]. Различия в акустических и теплофизических свойствах слоев композитной обмотки и металлического лейнера делает затруднительным выявление всего разнообразия дефектов обмотки с применением только акустического или теплового неразрушающего контроля. С учетом положительного опыта по синтезу результатов акустического и теплового контроля, описанного в опубликованных работах [13, 14], целесообразно рассмотреть подобный подход для выявления дефектов в композитной обмотке металлокомпозитных баллонов.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Описание тестового образца

Для проведения экспериментальных исследований по синтезу данных акустического и теплового контроля был изготовлен тестовый образец размером  $300 \times 200 \times 12$  мм (рис. 1а), представляющий собой макет стенки металлокомпозитного баллона. Композитная часть образца, состоявшая из трех склеенных пластин углепластика и стеклопластика общей толщиной 8 мм, была приклеена к пластине из дюралюминия толщиной 4 мм. Композит включал 30 слоев, соединенных эпоксидным клеем. Нижняя часть композита была выполнена из десяти слоев углепластика плотностью  $1980 \text{ кг/м}^3$ , средняя часть состояла из десяти слоев стеклопластика плотностью  $1830 \text{ кг/м}^3$ , а верхняя часть была выполнена из десяти слоев углепластика плотностью  $1530 \text{ кг/м}^3$ . В композитную часть образца были введены 18 искусственных дефектов трех типов, имитирующих расслоения (рис. 1б). Первая группа дефектов Р1—Р6 включала вставки из экструдированного пенополистирола размером  $10 \times 10 \times 0,1$  мм, располагавшиеся на глубинах от 0,5 до 7 мм. Вторая группа дефектов Т1—Т6 была изготовлена в виде вставок из двух слоев политетрафторэтилена (фторопласта) размером  $10 \times 10 \times 0,1$  мм, также размещенных на глубинах от 0,5 до 7 мм. На границе композита и дюралюминия были выполнены плоскостные отверстия (группа В1—В6) диаметром 10 мм и глубиной от 1 до 6 мм. Структура контрольного образца имитировала металлические цилиндры с композитным покрытием. Использование угле- и стеклопластика различной плотности имитировало объемную неоднородность композитов, которая осложняет применение стандартного акустического контроля с применением эхо-метода вследствие различной скорости звука в материалах с изменяющейся плотностью.

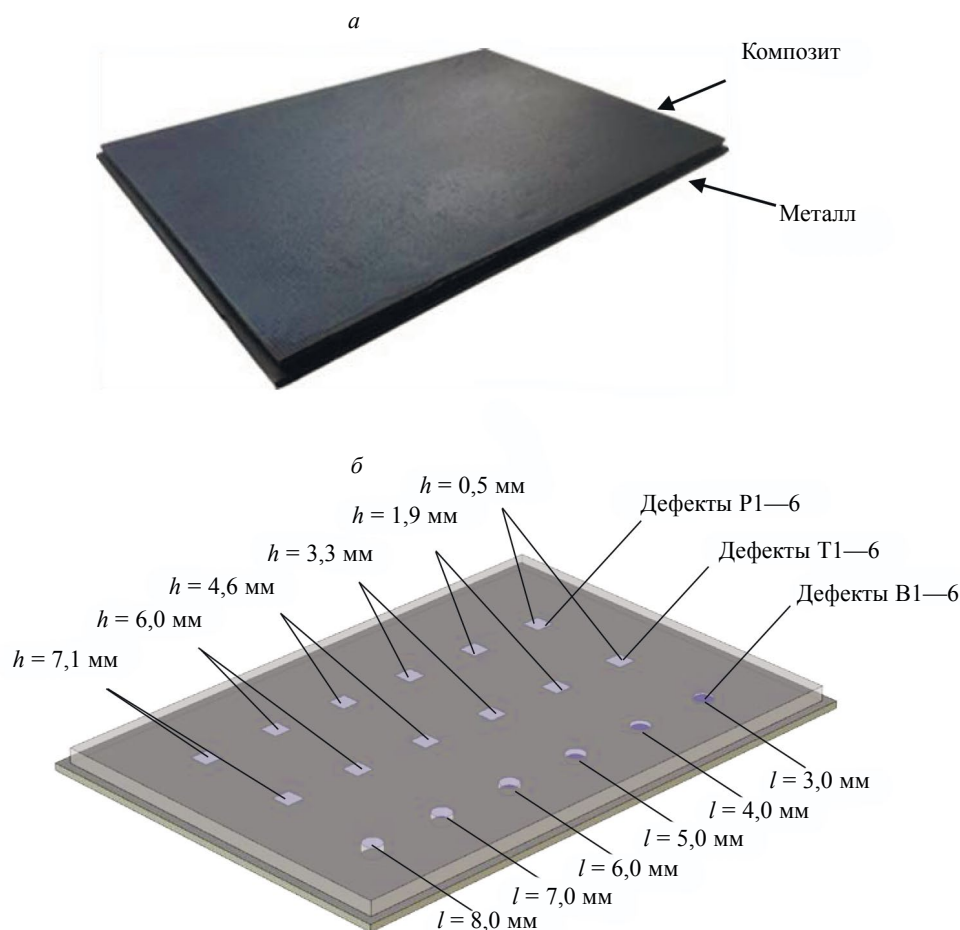


Рис. 1. Тестовый образец: фотография образца (а); схема дефектов (б).

### Тепловой неразрушающий контроль

Использована процедура классического одностороннего теплового контроля. Оптический нагрев образца осуществляли с помощью двух галогенных ламп общей мощностью 2 кВт (рис. 2). В большинстве случаев длительность нагрева составляла 15 с. Термограммы образца записывали с помощью тепловизионного модуля Optris PI 450 с частотой 5 Гц в течение 120 с.



Рис. 2. Лабораторная установка теплового контроля.

К полученным последовательностям термограмм применяли преобразование Фурье по времени с целью ограничить спектр сигнала десятью первыми частотами. Затем полученные фазограммы подвергались анализу главных компонент (РСА-алгоритм) с целью подчеркнуть дефектные отметки.

### Акустический контроль

Для автоматизированного акустического контроля с применением эхометода применяли лабораторную установку, представленную на рис. 3. В качестве УЗ преобразователя применялся датчик Olympus A306S-SU с рабочей частотой 2,25 МГц и диаметром пьезоэлемента 13 мм. Указанный преобразователь размещали на движущейся платформе, что обеспечивало двухмерное сканирование по траектории меандра с шагом 1 мм.

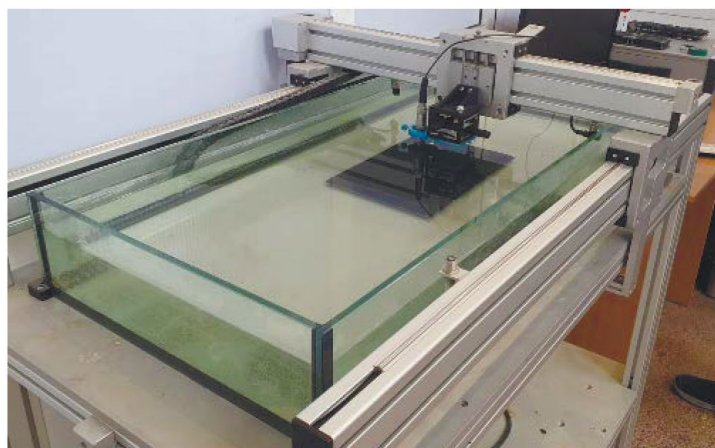


Рис. 3. Лабораторная установка акустического контроля.

## Синтез результатов акустического и теплового контроля

Процедура синтеза результатов акустического и теплового контроля включала следующие шаги:

- коррекцию искажений, обусловленных угловыми и линейными смещениями (при наличии) образца или аппаратуры контроля;
- приведение изображений к единому формату, соответствующему одному и тому же количеству пикселей по строкам и столбцам изображений, которые получены двумя видами неразрушающего контроля;
- амплитудную нормализацию изображений, например, приведение пиксельных амплитуд к интервалу от 0 до 1 для всех изображений;
- снижение уровня шумов путем пространственно-временной фильтрации;
- установку амплитудных порогов или введение корректирующих коэффициентов;
- слияние пиксельных амплитуд акустических и тепловых сигналов.

Результатом синтеза являлась карта дефектов, которую в настоящем исследовании получали с использованием алгоритма суммирования нормализованных пиксельных амплитуд, в том числе с учетом эмпирически определенных весов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Описание результатов контроля

Результаты теплового и акустического контроля приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

На исходных термограммах возможна идентификация дефектов Р1—3 и В1—2 (рис. 4а). Применение типичных в тепловом контроле методов анализа главных компонент (Principal Component Analysis — PCA) [17] и термографической реконструкции сигналов (Thermographic Signal Reconstruction — TSR) [18] позволило обнаружить почти все дефекты групп Р и В: дефекты Р1—4, В1—3 и Т1 были выявлены методом PCA (рис. 4б), в то время как метод TSR обеспечил идентификацию дефектов Р1—3, 5, 6, В1—6 и Т1 (рис. 4в). Следует отметить, что дефекты группы Т являются плохими имитаторами расслоений.

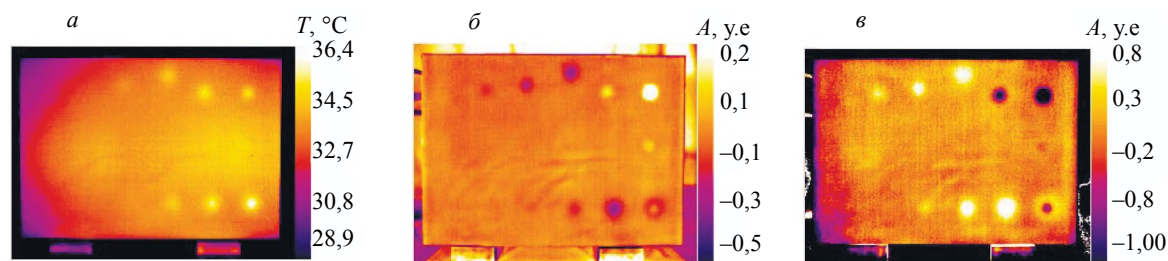


Рис. 4. Результаты ТК контрольного образца (односторонняя процедура, нагрев 15 с): исходная термограмма при 40 с (а); PCA-изображение (3-я компонента) (б); TSR-изображение (1-я производная) (в).

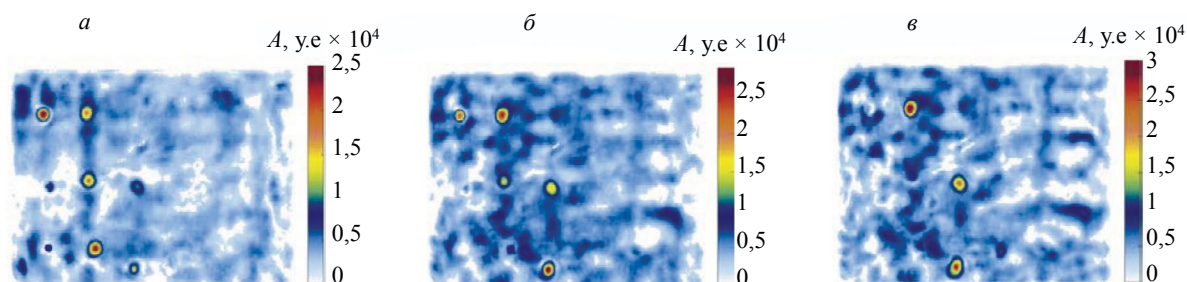


Рис. 5. Результаты акустического контроля тестового образца: карта дефектов, глубины 2-3 мм (а); карта дефектов, глубины 3-4 мм (б); карта дефектов, глубины 4-5 мм (в).

На рис. 5 представлены результаты акустического контроля в форме С-сканов на глубинах 2-3, 3-4 и 4-5 мм. Акустический контроль позволил выявить большинство дефектов на глубинах

до 5 мм. Получена низкая амплитуда эхосигналов для дефектов Т1 и В1, что не позволяет говорить о выявлении указанных несплошностей. При рассмотрении одной и той же глубины залегания дефектов наименьшую амплитуду эхосигналов обеспечивали несплошности группы Т.

Полученные результаты теплового и акустического контроля, представленные на рис. 4 и 5, показывают, что наиболее трудными для обнаружения являются вставки из фторопласта (дефекты Т1—6 в среднем ряду дефектов контрольного образца). Оба вида хорошо выявляют дефекты других типов на глубинах до 5 мм.

### Результаты синтеза акустического и теплового контроля

Исходя из результатов, полученных при раздельном использовании акустического и теплового видов контроля, их синтез был направлен на улучшение выявляемости дефектов всех типов и определение предельных глубин обнаружения дефектов.

Результатом синтеза является карта дефектов, которую в настоящем исследовании получали с использованием алгоритма суммирования нормализованных пиксельных амплитуд, в том числе с учетом эмпирически определенных весов.

На начальной стадии обработки данных формировали исходные последовательности одинаковой длительности (до 300 изображений в последовательности) с нормализованными от 0 до 1 пиксельными амплитудами. Важно отметить, что ИК-термограммы отражали изменение поверхностных температур во времени, в то время как акустические изображения содержали времена получения эхосигналов, соответствующих различным глубинам зондирования. Примеры двух изображений после нормализации показаны на рис. 6а, б. Соответствующие профили сигналов приведены на рис. 6в, г.

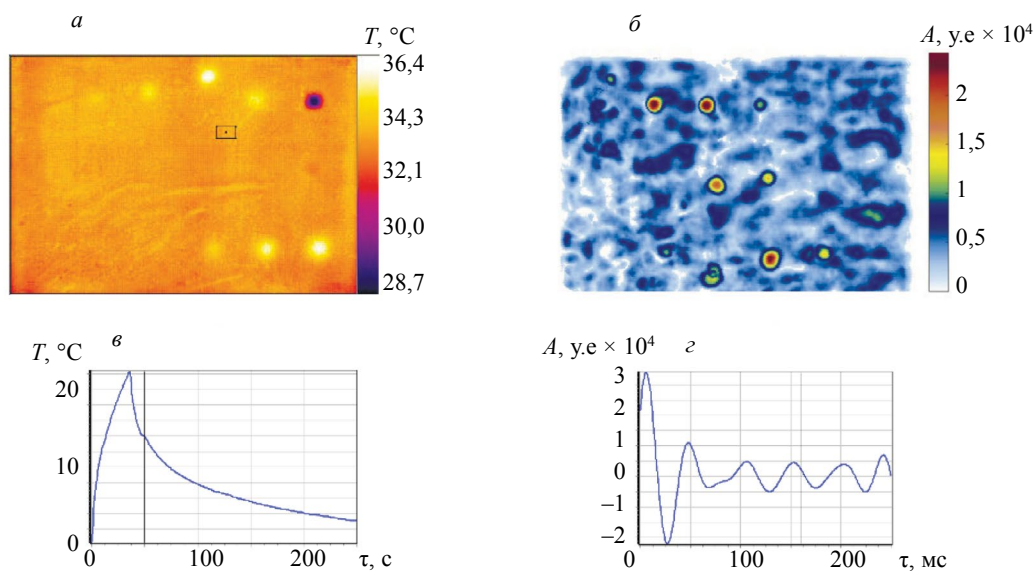


Рис. 6. Типичные изображения и профили сигналов: исходная ИК-термограмма (а); акустическое изображение, диапазон глубин 5-7 мм (б); профиль температуры (в); профиль УЗ эхосигналов (г).

Результатом слияния данных явилась синтезированная карта дефектов (рис. 7), на которой достоверность выявления дефектов, прежде всего групп Р и В, выше, чем в раздельных процедурах акустического и теплового контроля. Оператор может изменять «прозрачность» каждого изображения, используемого для синтеза данных, что позволяет улучшать визуальное распознавание одних дефектов, но может снижать контрастность представления других дефектов. Таким образом, требуется определенный компромисс между уровнем шумов и выявляемостью дефектов.

Простое сложение амплитуд пикселей может быть дополнено введением порогов, определенных эмпирически на тестовом образце с учетом шумов, после чего синтезированное изображение может быть получено путем выбора пикселей в акустических и ИК-изображениях с амплитудами, превышающими пороги. Фактически, данный алгоритм может быть применен для суперпозиции отдельных изображений в каждой последовательности, а также для изобраа-

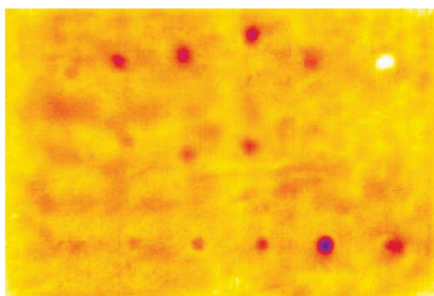


Рис. 7. Синтез акустических изображений и термограммы тестового образца без использования пороговых значений.

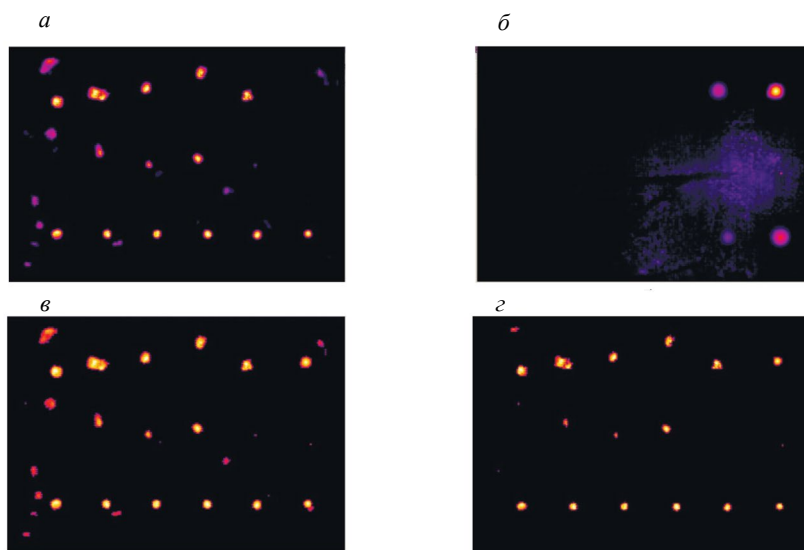


Рис. 8. Результаты синтеза данных при использовании алгоритма с введением порогов: синтез акустических изображений (а); синтез ИК-термограмм (б); синтез акустических изображений и ИК-термограмм без шумоподавления (в); синтез акустических изображений и ИК-термограмм при введении порогов подавления шумов (г).

жений, полученных с помощью различных видов неразрушающего контроля. Рис. 8а является результатом синтеза УЗ изображений, обеспечивая выявление от 15 до 18 дефектов в зависимости от квалификации оператора и выбранного критерия принятия решения. Соответственно результат синтеза только ИК-термограмм приведен на рис. 8б, где можно обнаружить 4 дефекта. Слияние акустического изображения и ИК-термограммы без подавления шумов, то есть без введения порогов, показано на рис. 8в, где идентифицируются от 16 до 18 дефектов, а также появляются несколько ложных отметок. Введение порогов 0,7 и 0,5 для результатов акустического и теплового контроля соответственно снизило количество ложных дефектов, но уменьшило количество выявленных истинных дефектов до 15. В целом, результаты, приведенные на синтезированных изображениях рис. 8в и 8г, показывают высокую достоверность выявления дефектов групп Р и В и в определенной степени группы Т. Очевидно, что введение порогов прямым образом влияет на размеры индикаций на синтезированном изображении, поэтому оценка размеров дефектов по синтезированным картам дефектов нецелесообразна.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любой вид неразрушающего контроля несет специфическую и ограниченную информацию о структуре контролируемого изделия. В данной работе рассмотрен синтез результатов акустической и тепловой дефектоскопии на примере неразрушающего контроля макета стенки металлополимерного баллона. Для этой цели предложен алгоритм синтеза данных контроля, который основан на попиксельном суммировании акустических изображений и ИК-термограмм. Данный алгоритм обладает универсальностью и простотой реализации. Проведенная экспериментальная верификация с использованием макета стенки металлополимерного водородного баллона

показала способность предложенного подхода обеспечивать повышение выявляемости дефектов различного типа, расположенных на различной глубине. При этом основной вклад в эффективную диагностику указанного макета вносит акустический неразрушающий контроль, а его синтез с результатами тепловой дефектоскопии позволяет улучшить выявление отдельных типов дефектов, например, расположенных в мертвой зоне эхометода акустического контроля.

Полученные результаты могут служить заделом для дальнейших исследований и разработок. Например, одним из направлений дальнейшей работы является поиск алгоритма, наиболее эффективно решающего задачу синтеза для дефектоскопии стенок водородных металлополимерных баллонов. Предложенный в данной работе алгоритм попиксельного суммирования прост для реализации, универсален и не требует большого количества данных контроля, что требуется, например, для подходов, основанных на применении методов машинного обучения. В то же время можно ожидать, что более сложные алгоритмы синтеза данных акустического и теплового контроля способны обеспечить более эффективное решение задач выявления дефектов и определения их параметров в тестовых образцах. Кроме того, научный и практический интерес представляет задача синтеза с получением трехмерных изображений. Подобные результаты могут обладать большой информативностью по сравнению с двухмерными изображениями и, таким образом, повышать достоверность неразрушающих испытаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания в рамках научного проекта № FSWW-2024-0001.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев В.Н., Алексеева О.К., Коробцев С.В., Серегина Е.А., Фатеева Т.В., Григорьев А.С., Алиев А.Ш. Проблемы аккумулирования и хранения водорода // *Kimya Problemleri*. 2018. № 4 (16). С. 453—483.
2. Barthélémy H., Weber M., Barbier F. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives // *International Journ. of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42 (11). P. 7254—7262.
3. Семеничев С.П., Глухов В.П., Мерзляков П.П., Килина О.В., Попов В.К. Изготовление металлокомпозитных баллонов (первый этап) // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2013. № 3 (33). С. 19—21.
4. Семеничев С.П., Глухов В.П., Мерзляков П.П., Килина О.В., Попов В.К. Изготовление металлокомпозитных баллонов (второй этап) // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2013. № 4 (34). С. 52—54.
5. Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.Ю., Генералов А.С., Горбовец М.А. Ультразвуковой контроль радиусных зон монолитных конструкций из углепластика радиусной фазированной решеткой и специальной оправкой // *Труды ВИАМ*. 2023. № 5 (123). С. 111—123.
6. Torbali M. E., Zolotas A., Avdelidis N.P. A state-of-the-art review of non-destructive testing image fusion and critical insights on the inspection of aerospace composites towards sustainable maintenance repair operations // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. No. 4. Article number: 2732.
7. Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Бедарев А.М., Яркимбаев Ш., Шагдыров Б.И. Синтез данных активной инфракрасной термографии при оптической и ультразвуковой стимуляции изделий из углепластика сложной формы // *Дефектоскопия*. 2020. № 7. С. 54—60.
8. Bevan R.L., Budyn N., Zhang J., Croxford A.J., Kitazawa S., Wilcox P.D. Data fusion of multiview ultrasonic imaging for characterization of large defects // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2020. V. 67. No. 11. P. 2387—2401.
9. Petrov I., Vdovenko A., Dolmatov D., Sednev D. The implementation of post-processing algorithm for ultrasonic testing of welds // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 510. No. 1. Article number: 012004.
10. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // *Дефектоскопия*. 2011. № 1. С. 21—38.
11. Zamiela C., Jiang Z., Stokes R., Tian Z., Netchaev A., Dickerson C., Tian W., Bian L. Deep multi-modal U-Net fusion methodology of thermal and ultrasonic images for porosity detection in additive manufacturing // *J. of Manufacturing Science and Engineering*. 2023. V. 145. No. 6. Article number: 061009.
12. Xiao X., Gao B., Yun Tian G., Qing Wang K. Fusion model of inductive thermography and ultrasound for nondestructive testing // *Infrared Physics & Technology*. 2019. V. 101. P. 162—170.
13. Yilmaz B., Ba A., Jasiuniene E., Bui H.K., Berthiau G. Evaluation of bonding quality with advanced nondestructive testing (NDT) and data fusion // *Sensors*. 2020. V. 20 (18). Article number: 5127.
14. Daryabor P., Safizadeh M.S. Image fusion of ultrasonic and thermographic inspection of carbon/epoxy patches bonded to an aluminum plate // *NDT & E International*. 2017. V. 90. P. 1—10.
15. Liu Z., Forsyth D.S., Komorowski J.P., Hanasaki K., Kirubarajan T. Survey: State of the art in NDE data fusion techniques // *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007. V. 56. No. 6. P. 2435—2451.
16. Воробей В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. Новосибирск: Наука, 2006, 189 с.

17. Winfree W.P., Cramer K.E., Zalameda J.N., Howell P.A., Burke E.R. Principal component analysis of thermographic data // *Thermosense: thermal infrared applications XXXVII*. 2015. V. 9485. P. 211—221.
18. Shepard S.M., Beemer M.F. Advances in thermographic signal reconstruction // *Thermosense: thermal infrared applications XXXVII*. 2015. V. 9485. P. 204—210.

## REFERENCES

1. Fateev V.N., Alekseeva O.K., Korobtsev S.V., Seregina E.A., Fateeva T.V., Grigoriev A.S., Aliev A.Sh.S., Aliev A.Sh. Problems of hydrogen accumulation and storage // *Kimya Problemleri*. 2018. No. 4 (16). P. 453—483 (in Russian).
2. Barthélémy H., Weber M., Barbier F. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives // *International J. of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42 (11). P. 7254—7262.
3. Semenichev S.P., Glukhov V.P., Merzlyakov P.P., Kilina O.V., Popov V.K. Manufacturing of metal-composite cylinders (first stage) // *Transport on alternative fuel*. 2013. No. 3 (33). P. 19—21 (in Russian).
4. Semenichev S.P., Glukhov V.P., Merzlyakov P.P., Kilina O.V., Popov V.K. Manufacturing of metal-composite cylinders (second stage) // *Transport on alternative fuel*. 2013. No. 4 (34). P. 52—54 (in Russian).
5. Boychuk A.S., Dikov I.A., Chertishev V.Y., Generalov A.S., Gorbovets M.A. Ultrasonic control of radius zones of monolithic structures made of carbon fibre-reinforced plastic by a radius phased array and a special mandrel // *Proceedings of VIAM*. 2023. No. 5 (123). P. 111—123 (in Russian).
6. Torbali M.E., Zolotas A., Avdelidis N.P. A state-of-the-art review of non-destructive testing image fusion and critical insights on the inspection of aerospace composites towards sustainable maintenance repair operations // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. No 4. Article number: 2732.
7. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Bedarev A.M., Yarkimbaev S., Shagdyrov B.I. Synthesizing data of active infrared thermography under optical and ultrasonic stimulation of products made of complex-shaped CFRP // *Defektoskopiya*. 2020. No. 7. P. 54—60.
8. Bevan R.L., Budyn N., Zhang J., Croxford A.J., Kitazawa S., Wilcox P.D. Data fusion of multiview ultrasonic imaging for characterization of large defects // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2020. V. 67. No. 11. P. 2387—2401.
9. Petrov I., Vdovenko A., Dolmatov D., Sednev D. The implementation of post-processing algorithm for ultrasonic testing of welds // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 510. No. 1. Article number: 012004.
10. Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Ultrasonic tomography of metal structures using the digitally focused antenna array method // *Defektoskopiya*. 2011. No 1. P. 21—38.
11. Zamiela C., Jiang Z., Stokes R., Tian Z., Netchaev A., Dickerson C., Tian W., Bian L. Deep multi-modal U-Net fusion methodology of thermal and ultrasonic images for porosity detection in additive manufacturing // *Journ. of Manufacturing Science and Engineering*. 2023. V. 145. No. 6. Article number: 061009.
12. Xiao X., Gao B., Yun Tian G., Qing Wang K. Fusion model of inductive thermography and ultrasound for nondestructive testing // *Infrared Physics & Technology*. 2019. V. 101. P. 162—170.
13. Yilmaz B., Ba A., Jasiuniene E., Bui H.K., Berthiau G. Evaluation of bonding quality with advanced nondestructive testing (NDT) and data fusion // *Sensors*. 2020. V. 20 (18). Article number: 5127.
14. Daryabor P., Safizadeh M.S. Image fusion of ultrasonic and thermographic inspection of carbon/epoxy patches bonded to an aluminum plate // *NDT & E International*. 2017. V. 90. P. 1—10.
15. Liu Z., Forsyth D.S., Komorowski J.P., Hanasaki K., Kirubarajan T. Survey: State of the art in NDE data fusion techniques // *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007. V. 56. No. 6. P. 2435—2451.
16. Vorobei V.V., Markin V.B. Quality control of manufacturing and repair technology of composite structures. Novosibirsk: Nauka, 2006. 189 p. (In Russian).
17. Winfree W.P., Cramer K.E., Zalameda J.N., Howell P.A., Burke E.R. Principal component analysis of thermographic data // *Thermosense: thermal infrared applications XXXVII*. 2015. V. 9485. P. 211—221.
18. Shepard S.M., Beemer M.F. Advances in thermographic signal reconstruction // *Thermosense: thermal infrared applications XXXVII*. 2015. V. 9485. P. 204—210.