

СИНТЕЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УДАРНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В УГЛЕПЛАСТИКЕ МЕТОДАМИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ И ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ

© 2024 г. В.Ю. Шпильной^{1,*}, Д.А. Дерусова^{1,**}, В.П. Вавилов^{1,***}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: *vshpilnoy@list.ru; **red@tpu.ru; ***vavilov@tpu.ru

Поступила в редакцию 18.03.2024; после доработки 29.03.2024
Принята к публикации 29.03.2024

Предложен способ синтеза данных, полученных одним или несколькими методами неразрушающего контроля. Экспериментальная апробация проведена на примере исследования ударного повреждения в углепластиковом композите методами лазерной виброметрии и теплового контроля. Данные методы различаются по физическому принципу воздействия на исследуемые объекты и форме результатов контроля. Синтез полученных данных и их интерпретация позволяют повысить достоверность результатов контроля и комплексно проводить процедуру дефектометрии. Алгоритм синтеза включал как усреднение данных одного метода контроля на примере анализа виброграмм, полученных в ходе лазерного вибросканирования на различных частотах вводимого акустического сигнала, так и слияние результатов, полученных с помощью теплового контроля и лазерной виброметрии. Синтез данных позволил уточнить размер и расположение дефекта, автоматизировать процесс распознавания неоднородностей, повысить производительность испытаний, а также снизить субъективность анализа результатов испытаний.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, тепловой контроль, лазерная виброметрия, синтез данных, полимерные композиционные материалы.

APPLYING DATA FUSION PROCEDURES TO EVALUATION OF IMPACT DAMAGE IN CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC BY USING OPTICAL INFRARED THERMOGRAPHY AND LASER VIBROMETRY TECHNIQUES

© 2024 V.Yu. Shpilnoi^{1,*}, D.A. Derusova^{1,**}, V.P. Vavilov^{1,***}

National Research Tomsk Polytechnic University, 634028 Tomsk, Lenin Ave., 30, Russia
E-mail: *vshpilnoy@list.ru; **red@tpu.ru; ***vavilov@tpu.ru

This study was devoted to the development of data fusion techniques obtained by one or several nondestructive testing (NDT) methods. Experimental results were obtained by applying laser vibrometry and optical infrared thermography to evaluation of impact damage in carbon fiber composite. These NDT techniques are different by their physical nature and supply specific testing results. The proposed data fusion method allows increasing reliability of inspection results and enables estimating defect parameters. It involves both averaging data of each single NDT technique and merging the results obtained by two methods. Vibrograms obtained by laser vibrometry were used to analyze acoustic response of the test sample toward stimulation at different frequencies. In its turn, infrared thermographic NDT supplies the sample response toward thermal stimulation. It has been shown that the fusion of these two techniques supplies a comprehensive information on defect size and location. Also, the automation of the fusion procedure increases NDT productivity and reduces subjectivity of testing results.

Keywords: non-destructive testing, infrared thermography, laser vibrometry, data fusion, polymer composite materials.

DOI: 10.31857/S0130308224020051

1. ВВЕДЕНИЕ

Расширение номенклатуры производства композиционных материалов в различных областях промышленности [1—5] приводит к повышению требований [6—11], предъявляемых к качеству готовых изделий. Основной задачей неразрушающего контроля (НК) является определение целостности материалов, их свойств и структуры путем обнаружения дефектов на различных этапах производства, а также в процессе эксплуатации изделий. Результаты НК позволяют оценить надежность и эксплуатационную пригодность исследуемых материалов, деталей и узлов.

Ввиду особенностей структуры слоистые композиционные материалы представляют собой сложные объекты для НК. В связи с этим в производственной практике зачастую проводят НК композитов несколькими методами, различающимися по физическому принципу воздействия на контролируемые изделия. Сравнение результатов позволяет получить более полную информацию о наличии дефектов и снизить вероятность возникновения ошибки оператора при принятии решения о дефектности контролируемого изделия. Поэтому разработка алгоритмов и программного обеспечения для анализа данных становится актуальной.

Одним из современных методов обработки результатов НК является синтез данных. Эта процедура позволяет преобразовывать и объединять данные, полученные как одним, так и несколькими методами НК, что имеет важное значение для повышения достоверности НК. В частности, в работе [12] авторы оценили результаты синтеза данных, полученные в рамках одного метода НК, а именно применения высокочастотных электромагнитных волн для определения расположения и границ подземных структур. Синтез данных осуществляли путем слияния результатов, полученных во временной и частотной областях, с использованием весовых коэффициентов, алгоритмов шумоподавления и нормализации. Результаты исследования показали, что синтез данных, полученных даже в рамках одного метода НК, позволил повысить разрешение и информативность результатов контроля.

Синтез результатов применения нескольких способов НК описан в работе [13]. Авторы объединили результаты контроля композиционного материала, армированного углеродным волокном, полученные методом теплового контроля с использованием вихревых и тепловых источников стимуляции. Процедура синтеза заключалась в попиксельном объединении изображений и фильтрации шумов путем введения весовых коэффициентов, что позволило повысить достоверность обнаружения дефекта. Следует заметить, что в данном случае результаты контроля были согласованы между собой вследствие единообразия способов регистрации данных с помощью инфракрасных (ИК) тепловизоров.

Практическая реализация синтеза данных существенно упрощается, если исходные данные, используемые для анализа, имеют аналогичный формат, пространственное разрешение и другие характеристики. Если для интерпретации используют данные, полученные принципиально различными методами НК, в ходе синтеза могут возникнуть трудности, такие как неполнота сведений об объекте, несогласованность, конфликты, физическая неоднородность данных и т.п. [14, 15]. Исходные данные могут быть представлены в различных форматах. Например, поле температур представляет собой матрицу значений средней температуры в каждом сегменте (пикселе) ИК-изображения [16], в то время как результаты капиллярного метода НК представляют в виде графических изображений [17]. В этом случае для выработки надежного решения о дефектности исследуемого материала в рамках синтеза требуется проводить предварительную обработку исходных изображений, разработать иерархическое преобразование собранных данных и применять интегрированные решения для их анализа, что становится нетривиальной задачей научных исследований.

В настоящем исследовании предложен новый способ синтеза данных, полученных одним или несколькими методами НК, основанный на алгоритме попиксельного анализа графических изображений, представленных в различных форматах. Исследование выполнено на примере НК углепластиковых композитов методами теплового контроля (ТК) и лазерной виброметрии (ЛВ). Синтез данных осуществляли как в рамках одного метода НК, так и нескольких методов, различающихся по физическому принципу воздействия на контролируемые изделия, что позволило оценить достоинства и недостатки предложенного подхода.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методами сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и теплового контроля проведено исследование контрольного образца из углепластикового композита размерами $155 \times 175 \times 3,5$ мм³, содержавшего ударное повреждение энергией 18 Дж в центральной области, как показано на рис. 1.

Для проведения НК методом ЛВ использована лабораторная установка (рис. 2), включающая магнитострикционный преобразователь (резонансная частота $22 \pm 1,65$ кГц, мощность $0,63 \pm 10$ % кВт), ультразвуковой генератор USG-2-22-MS-1 (диапазон рабочих частот 14—48 кГц, мощность до 1 ± 10 % кВт) и сканирующий лазерный доплеровский виброметр PSV-500-3D (Polytec, Германия). Лазерный виброметр позволяет измерять амплитуду скорости колебаний частиц среды в диапазоне от 0,01 мкм/с до 30 м/с при измерении спектра частот от 10 Гц до

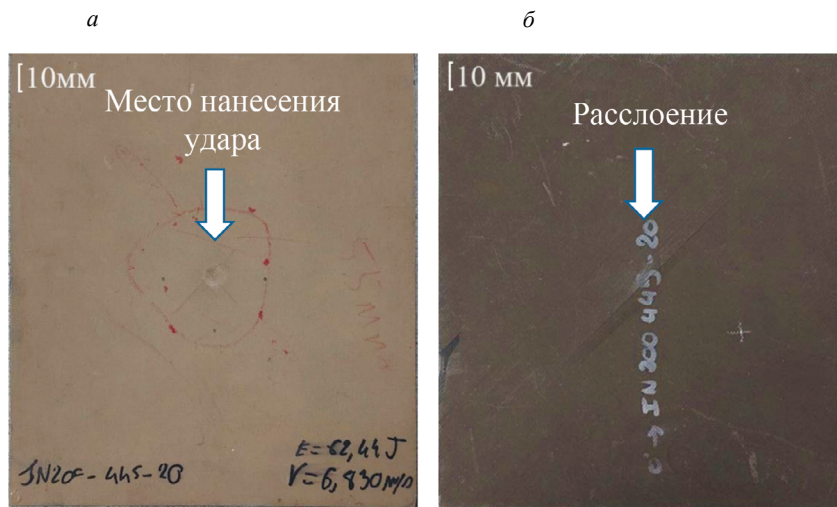


Рис. 1. Фотографии контрольного углепластикового образца с лицевой (а) и тыльной (б) сторон.

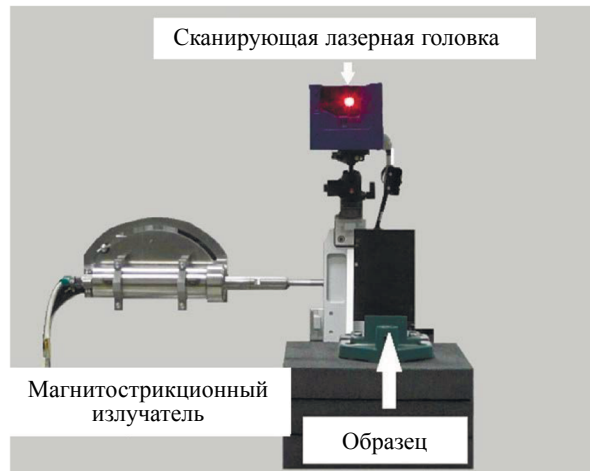


Рис. 2. Фотография установки для акустической стимуляции контрольного образца из углепластика с использованием воздушносвязанного магнитострикционного излучателя.

20 МГц. Система управления ультразвукового генератора обеспечивает автоматический поиск и стабильное поддержание работы устройства на частоте резонанса электромеханической системы. Потребляемую электрическую мощность магнитострикционного излучателя задает оператор в диапазоне от 500 Вт до 1 кВт в зависимости от эксплуатационных характеристик волноводов, совмещенных с магнитостриктором.

Результатом лазерного вибросканирования в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц является амплитудно-частотный спектр вибраций в каждой точке сканирования, а также виброграммы, отображающие распределение механических колебаний на поверхности материалов в процессе УЗ стимуляции. Количество спектральных линий составило 3200, что соответствовало шагу частотного сканирования 30 Гц.

Лабораторная установка импульсного оптического ТК включала ИК-тепловизор Optris PI450 (спектральный диапазон 8—14 мкм, формат кадра 382×288, частота записи кадров до 30 Гц в диапазоне температур от 0 до 250 °С), импульсные ксеноновые лампы (энергия излучения 1,6 кДж, длительность около 10 мс), блок синхронизации, а также персональный компьютер с программным обеспечением (ПО) для обработки данных ThermoLab. Фотография лабораторной установки ТК приведена на рис. 3.



Рис. 3. Фотография лабораторной установки ТК.

ТК проводили в двустороннем режиме, т.е. ИК-тепловизор и источник нагрева располагали с противоположных сторон образца (см. рис. 3). В ходе эксперимента образец подвергали однократной импульсной стимуляции с использованием ксеноновой лампы. Распределение температурного поля на поверхности контролируемого изделия регистрировали с помощью ИК-тепловизора в процессе тепловой стимуляции и в течение 100 с на стадии охлаждения. Частота записи ИК-термограмм составляла 10 Гц, время наблюдения — 10 с.

Синтез результатов НК осуществляли в разработанном программном обеспечении (ПО) DeFinder. ПО позволяет проводить анализ графических изображений форматов *.jpg, *.jpeg, *.png, полученных различными методами НК, а также производить расчет площади дефектов. Для корректной работы с программой палитра цветов, используемых в графических данных, должна быть монохромной, двух- или трехцветной, а изображения, используемые для синтеза данных, должны иметь одинаковый формат. При работе с ПО оператор должен указать количество цветов в палитре и расставить соответствующие маркеры, задать линейные размеры образца для пересчета в пикселях на миллиметр, выставить требуемый показатель отношения сигнал/шум, который будет являться пороговым критерием для вычисления дефектных зон. Каждому цвету в RGB-палитре присваивают определенное численное значение. Далее производят нормировку данных и их синтез, основанный на операциях булевой алгебры, в соответствии с заданным пороговым значением отношения сигнал/шум.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Лазерная виброметрия

Результатом ЛВ были виброграммы лицевой (рис. 4а) и обратной (рис. 4б) поверхностей контрольного образца.

Приведенные на рис. 4 виброграммы отображают распределение амплитуды колебаний на поверхности образца, усредненное в диапазоне частот от 19 до 23 кГц с использованием системы управления лазерного виброметра. Полученные данные показали наличие дефекта, площадь которого, измеренная на лицевой стороне, составила 200 мм² (отношение сигнал/шум 7,5), в то время как на оборотной стороне образца — 1350 мм² (отношение сигнал/шум 12). Важно отметить, что различие в оценке площади дефектов по амплитуде и пороговому значению сигнал/шум в данном случае связано с различной глубиной залегания индивидуальных трещин и расслоений в интегральном ударном повреждении по отношению к наблюдаемой поверхности. В частности, амплитуда колебаний дефекта, близко расположенного к контролируемой поверхности, выше, чем в случае дефекта, залегающего на большей глубине. В связи с этим усреднение данных в избирательном диапазоне частот позволяет построить итоговое изображение, учитывающее колебания отдельных частей многослойного дефекта.

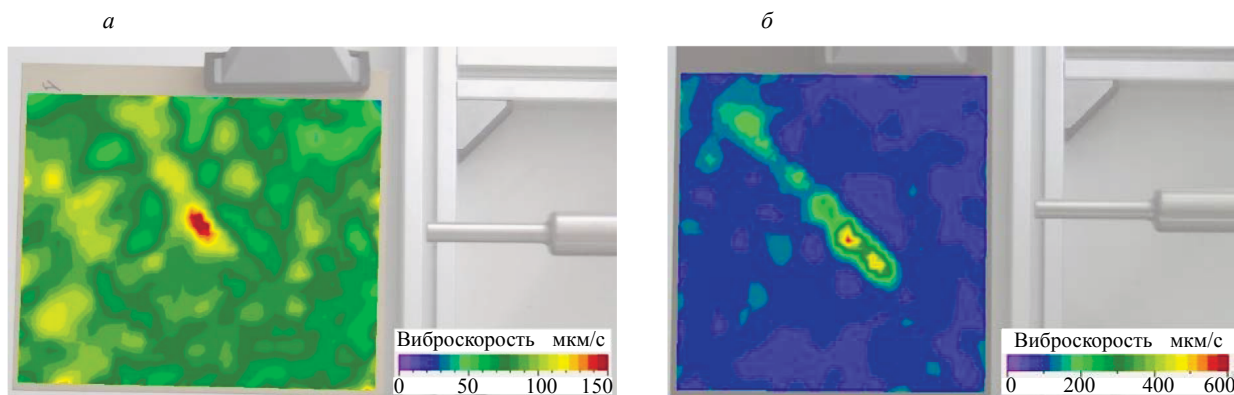


Рис. 4. Виброграммы лицевой и обратной поверхностей контрольного образца из углепластика, полученные в результате лазерного вибросканирования при бесконтактной ультразвуковой стимуляции:
а — лицевая поверхность; *б* — обратная поверхность.

Несмотря на резонансный режим работы магнитострикционного преобразователя, экспериментальные данные также могут быть усреднены. Однако в данном случае диапазон рабочих частот излучателя существенно ограничен, что следует учитывать при анализе данных. Амплитудно-частотный спектр акустического сигнала, вводимого в контролируемое изделие с использованием воздушносвязанного магнитострикционного излучателя, приведен на рис. 5.

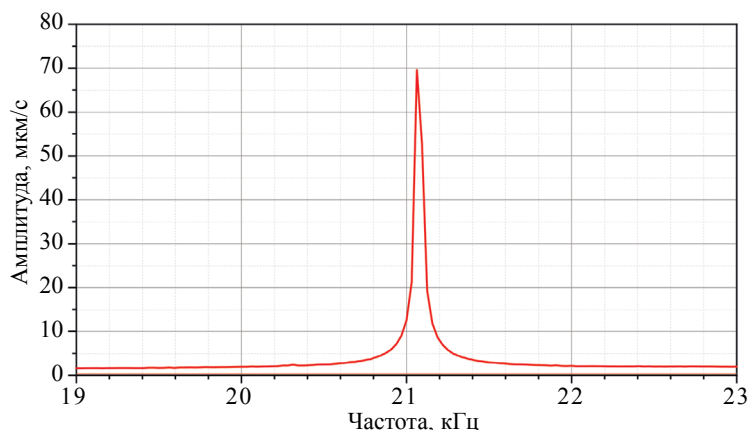


Рис. 5. Амплитудно-частотный спектр колебаний контрольного образца из углепластика.

Фактически, в процессе работы магнитострикционного преобразователя в контролируемое изделие вводят упругие волны в диапазоне частот от 20,8 до 21,5 кГц, максимальная амплитуда сигнала составляла 60 мкм/с на частоте 21,06 кГц. Следует отметить, что незначительное изменение амплитуды колебаний в околорезонансном диапазоне приводит к возбуждению колебаний различных частей дефекта, что может быть зарегистрировано лазерным виброметром на соответствующих частотах. В связи с этим для синтеза данных в ПО DeFinder были выбраны виброграммы на частотах 21250, 21312, 21375, 21438 и 21531 Гц (см. рис. 6).

Виброграммы на рис. 6 показывают, что сигнатуры ударного повреждения различаются в зависимости от частоты ультразвуковой стимуляции. Это связано с тем, что изменение частоты воздействующего сигнала приводит к изменению расположения пучностей и узлов стоячих волн как в исследуемом образце в целом, так и в локальной области дефекта. Также изменение частоты ультразвука приводит к вовлечению в процесс резонансных колебаний расслоения, расположенные на различной глубине залегания. Поэтому для уточнения информации о размере и форме дефектов зарегистрированные виброграммы целесообразно усреднять во всем диапазоне измеренных частот, используя процедуру синтеза данных.

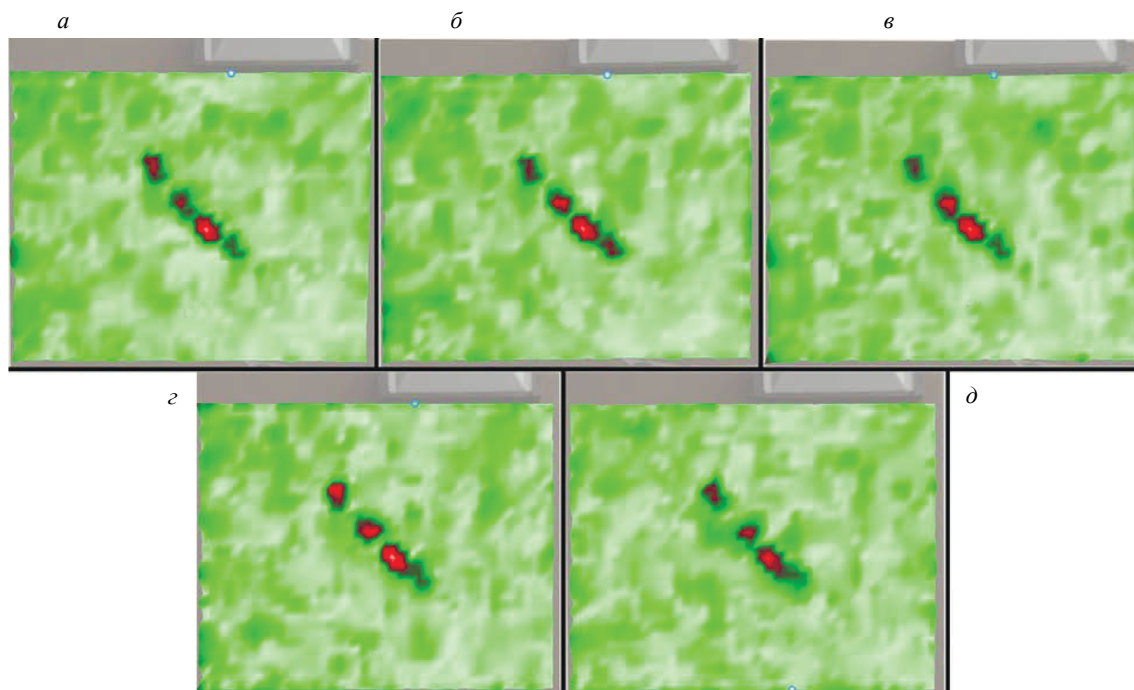


Рис. 6. Виброграммы контрольного образца на частотах 21250 Гц (а), 21312 Гц (б), 21375 Гц (в), 21438 Гц (г) и 21531 Гц (д).

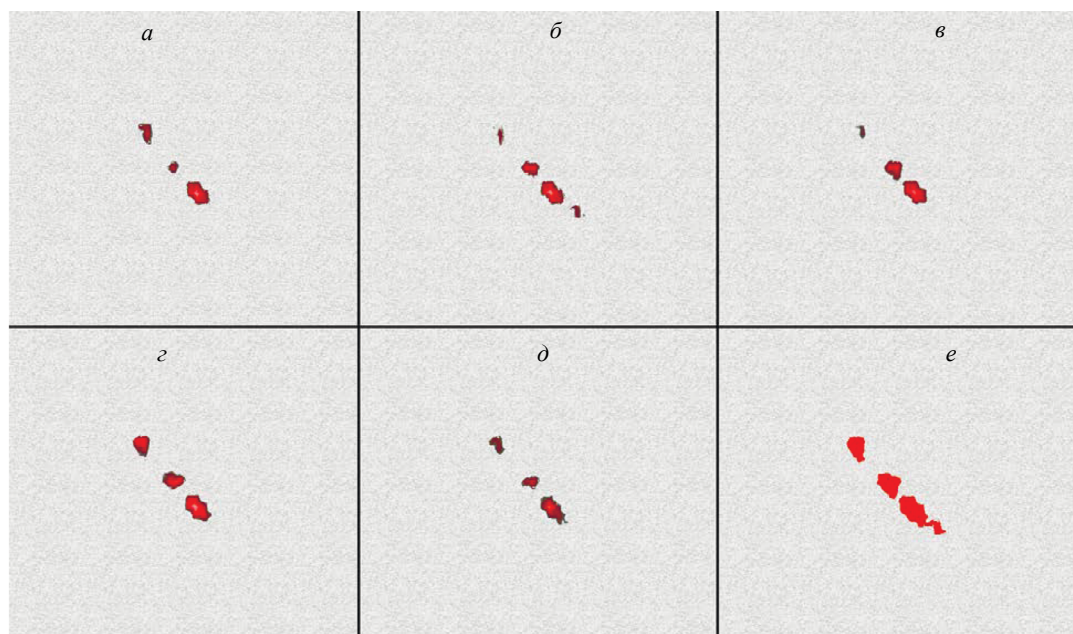


Рис. 7. Результаты определения дефектных областей в углепластике на различных частотах и использованием ПО DeFinder: 21250 Гц (а); 21312 Гц (б); 21375 Гц (в); 21438 Гц (г); 21531 Гц (д); синтез данных (е).

В настоящем исследовании экспериментальные виброграммы были подвергнуты синтезу в ПО, что позволило выделить дефектную область по заданному уровню отношения сигнал/шум и рассчитать ее площадь с учетом вклада колебаний различных участков дефекта в исследуемом диапазоне частот. Для определения максимальной площади повреждения операция булевого сложения была применена в рамках синтеза нескольких виброграмм. Сигнатуры дефектных зон, рассчитанные в ПО, приведены на рис. 7.

На рис. 7 приведены результаты оценки дефектных областей в образце в диапазоне частот от 21,25 до 21,531 кГц и их дизъюнктивного синтеза. Для уточнения границ дефектной области было применено булево сложение (дизъюнкция) результатов эксперимента (см. рис. 7е). Указанная процедура позволила ограничить максимальную зону дефекта для каждого рассматриваемого изображения. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Площадь дефектной области, рассчитанная на различных частотах ультразвука, а также в результате синтеза данных

Частота, Гц	Площадь дефектной области, мм ²
21250	173
21312	196
21375	168
21438	246
21531	184
Булево сложение	321

Как видно из полученных данных (см. табл. 1), суммарная площадь дефектной области, определенная по результатам синтеза, в 1,3—1,85 раз превосходит экспериментальные результаты, рассчитанные для отдельных частот. В связи с этим для уточнения размеров и расположения дефектов необходимо проводить анализ виброграмм, зарегистрированных в избирательном диапазоне частот. Дизъюнктивный синтез в свою очередь позволяет уточнить размеры дефектов в композитах типа ударных повреждений.

3.2. Тепловой контроль

Результатом двухстороннего ТК была последовательность ИК-термограмм, отражающая процесс охлаждения исследованного композита. На рис. 8 приведена термограмма, зарегистрированная через 1,7 с после окончания тепловой стимуляции, что соответствовало максимальному контрасту дефектной и бездефектной зон.

Как видно из рис. 8, изменение температуры в области дефекта по сравнению с бездефектной зоной составило 10 °С, причем температура дефекта ниже, чем в бездефектной зоне, что связано

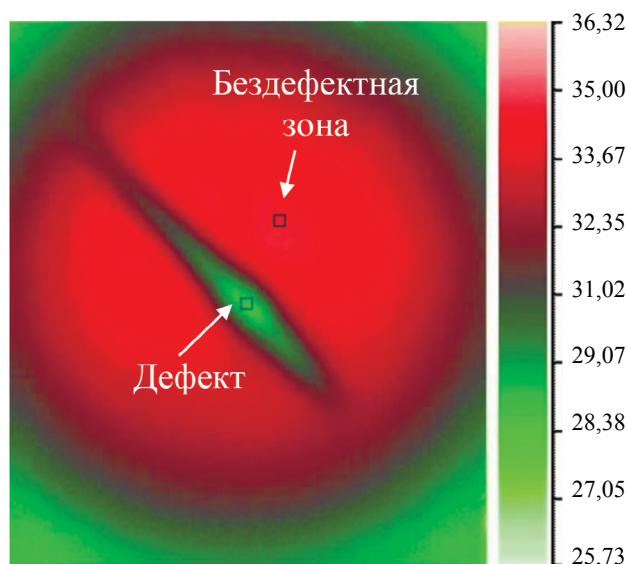


Рис. 8. Температурное поле контрольного образца через 1,7 с после нагрева.

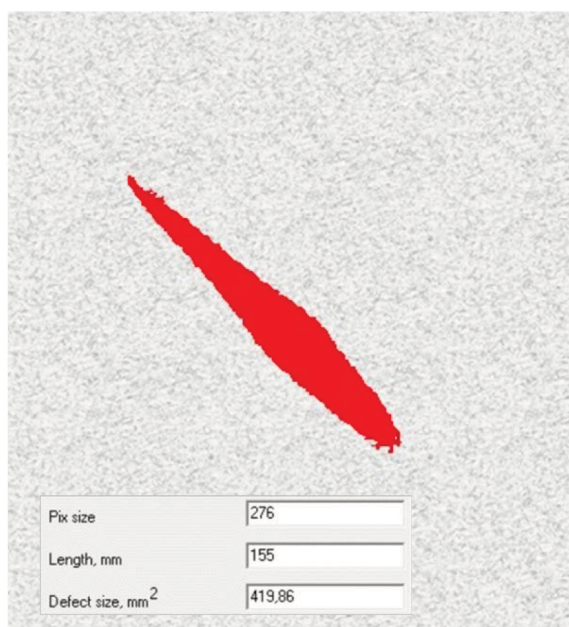


Рис. 9. Дефектная область, выделенная с помощью ПО DeFinder по результатам ТК контрольного образца.

с наличием воздушных полостей и трещин в структуре композита, повышающих локальное тепловое сопротивление композита.

Экспериментальная термограмма (см. рис. 8) была экспортирована в ПО DeFinder с целью выделения области дефекта и осуществления синтеза данных. Согласно использованному алгоритму, ПО производит расчет переходных оттенков палитры от минимального до максимального значения на температурной шкале. Далее попиксельно производят пересчет RGB-значений в вещественные числа с последующей нормировкой данных. После фильтрации термограмм по установленной пороговой величине отношения сигнал/шум выделяют дефектную зону и вычисляют ее площадь. В частности, для выбранного порога отношения сигнал/шум более 2 на термограмме была выделена область дефекта, показанная на рис. 9. Площадь дефектной зоны, изображенной красным цветом, составила 420 мм². В данном случае в качестве фона использован один из шаблонов, предлагаемых в ПО DeFinder, — регулярный серый. Однако в качестве фона также может быть выбрано одно из исходных изображений или фотография контролируемого изделия с целью уточнения масштаба и расположения дефекта. Полученное изображение (см. рис. 9) было в дальнейшем использовано для проведения синтеза данных ТК с результатами ЛВ.

3.3. Синтез данных

Синтез результатов ЛВ и ТК был проведен в ПО DeFinder двумя способами: путем булевого сложения и булевого умножения графических изображений. Алгоритм дизъюнктивного и конъюнктивного синтеза данных позволяет получить изображение, основанное на соответствующих логических операциях, примененных к пикселям с одинаковыми координатами на двух изображениях. Результатом этих операций являются области объединения и пересечения дефектных зон соответственно. На рис. 10 приведены результаты дизъюнктивного (а) и конъюнктивного (б) синтеза данных ЛВ и ТК.

В результате проведения синтеза данных в ПО DeFinder была определена суммарная площадь дефекта — 430 мм² (рис. 10а). Проведение дизъюнктивного синтеза данных (см. рис. 10а) позволило незначительно увеличить оценку площади дефекта до 445 мм², а проведение конъюнктивного синтеза (рис. 10б) — локализовать места, где одновременно используемые методы НК выявили дефектную зону. Результаты конъюнктивного синтеза в свою очередь могут являться критерием критического состояния материала.

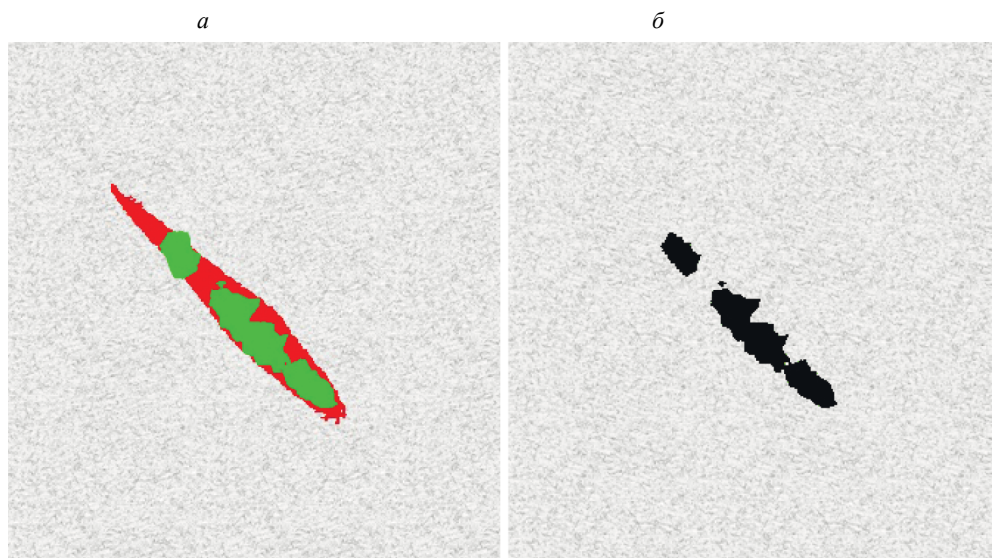


Рис. 10. Дизъюнктивный синтез (а) дефектных областей, определенных по результатам ТК (красный) и ЛВ (зеленый), а также их конъюнктивный синтез (б) (черный).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании предложен новый способ синтеза данных, основанный на попиксельном анализе графических изображений, представленных в различных форматах и получаемых одним или несколькими методами НК. Алгоритм реализован в ПО DeFinder и позволяет автоматически распознавать расположение и форму дефектов, а также рассчитывать их площадь.

Вышеуказанный способ синтеза данных был апробирован на примере НК контрольного образца из углепластикового композита методами теплового контроля и лазерной виброметрии. Применены процедуры нормировки данных фильтрации по уровню отношения сигнал/шум, а также логические операции конъюнкции и дизъюнкции. Синтез данных осуществляли как в рамках одного метода НК для объединения данных лазерной виброметрии, полученных на различных частотах акустического сигнала, так и в рамках слияния результатов различных методов на примере анализа виброграмм и ИК-термограмм. По результатам ТК была определена максимальная зона ударного повреждения, в то время как лазерная виброметрия позволила уточнить границы дефекта. Таким образом, проведение синтеза данных позволило дополнить исходную информацию о сигнатурах ударного повреждения в углепластиковом композите, полученную каждым методом неразрушающего контроля, автоматизировать процесс распознавания дефектов, повысить производительность испытаний, а также снизить субъективность анализа данных.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 23-79-01199 (разработка алгоритма синтеза данных, экспериментальные исследования методом теплового контроля) и гранта РФФИ № 23-79-10107 (оборудование и экспериментальные результаты лазерной виброметрии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В.В., Карпов А.А., Карпов И.А., Кокцинская Е.М., Хусаинов Р.Р. Анализ трендов перспективных материалов для нефтегазовой отрасли // ПРОНЕФТЬ. ПРОФЕССИОНАЛЬНО О НЕФТИ. 2022. № 3 (25). С. 136—147.
2. Meng Fanran, Cui Yuanlong, Pickering Steve, McKechnie Jon. From aviation to aviation: Environmental and financial viability of closed-loop recycling of carbon fibre composite // Composites Part B: Engineering. 1 November 2020. V. 200. P. 108362.
3. Tian Pei-Xiu, Li Yi-Dong, Hu Zhi, Zeng Jian-Bing. Fire-resistant and high-performance epoxy vitrimers for fully recyclable carbon fiber-reinforced composites // Materials Today Chemistry. March 2024. V. 36. P. 101965.
4. Pothnis Ja.R., Hajagolkar A.K., Anilchandra A.R., Das R., Gururaja S. Open-hole fatigue testing of ud-gfrp composite laminates containing aligned cnts using infrared thermography // COMPOSITE STRUCTURES. 2023. No. 324. P. 117557.

5. *Liu W.* Influence of nano-cutting fluid in new cutting and forming processes on heat transfer performance of mechanical engineering // *International Journal of Analytical Chemistry*. 2022. No. 2022. P. 5603355.
6. *Долматов Д.О., Хайрулин А.Р., Смолянский В.А.* Ультразвуковая томография с применением разреженных матричных антенных решеток и цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области // *Дефектоскопия*. 2023. № 5. С. 3—11.
7. ГОСТ Р 58062—2018 Национальный стандарт Российской Федерации «Ткани на основе углеродных волокон». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200158294> (последнее обращение 04.03.2024 г.).
8. *Caballol David, Raposo Álvaro P., Gil-Carrillo Francisco.* Non-destructive testing of concrete layer adhesion by means of vibration measurement // *Construction and Building Materials*. 12 January 2024. V. 411. P. 134548.
9. *Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Ермоленко О.А.* Моделирование работы бесконтактного ультразвукового преобразователя в системах активного волнового мониторинга тонкостенных конструкций // *Дефектоскопия*. 2022. № 8. С. 12—24.
10. *Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С., Смотрова С.А., Иванов В.И.* Контроль образцов из полимерных композиционных материалов с использованием ультразвуковых антенных решеток // *Дефектоскопия*. 2022. № 6. С. 3—16.
11. *Дубинский С.В., Казьмин Е.А., Ковалев И.Е., Корнилов А.Б., Корнилов Г.А., Костенко В.М., Чернявский А.А.* Развитие вибротермографии как метода неразрушающего контроля изделий из полимерных конструкционных материалов с использованием принудительных механических вибраций // *Дефектоскопия*. 2021. № 6. С. 35—45.
12. *Bi Wenda, Zhao Yonghui, Shen Ruiqing, Li Bo, Hu Shufan, Ge Shuangcheng.* Multi-frequency GPR data fusion and its application in NDT // *NDT & E International*. October 2020. V. 115. P. 102289.
13. *Gros X.E., Bousigue J., Takahashi K.* NDT data fusion at pixel level // *NDT & E International*. July 1999. V. 32. Is. 5. P. 283—292.
14. *Han Wei, Feng Kan, Yang Huagen.* Phase Reversal Method for Damage Imaging in Composite Laminates Based on Data Fusion // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. Is. 6. P. 2894.
15. *Hassani Sahar, Dackermann Ulrike, Mousavi Mohsen, Li Jianchun.* A systematic review of data fusion techniques for optimized structural health monitoring // *NDT & E International*. March 2024. V. 103. P. 102136.
16. Номенклатура и технические характеристики ИК камер PI Series (The Precision Line). Режим доступа: <https://www.optris.com/en/products/infrared-cameras/pi-series/> (последнее обращение 04.03.2024г.).
17. *Филатов К.А.* Методы определения секций трубопроводов на местности без проведения вскрышных работ (капиллярный и ультразвуковой методы) // *Инновации. Наука. Образование*. 2021. № 47. С. 1945—1951.

REFERENCES

1. *Zhukov V.V., Karpov A.A., Karpov I.A., Koktsinskaya E.M., Khusainov R.R.* Analysis of trends in promising materials for the oil and gas industry // *PRONEFT. PROFESSIONALLY ABOUT OIL*. 2022. No. 3 (25). P. 136—147.
2. *Fanran Meng, Cui Yuanlong, Pickering Steve, McKechnie Jon.* From aviation to aviation: Environmental and financial viability of closed-loop recycling of carbon fibre composite // *Composites Part B: Engineering*. 1 November 2020. V. 200. P. 108362.
3. *Tian Pei-Xiu, Li Yi-Dong, Hu Zhi, Zeng Jian-Bing.* Fire-resistant and high-performance epoxy vitrimers for fully recyclable carbon fiber-reinforced composites // *Materials Today Chemistry*. March 2024. V. 36. P. 101965.
4. *Pothnis Ja.R., Hajagolkar A.K., Anilchandra A.R., Das R., Gururaja S.* Open-hole fatigue testing of ud-gfrp composite laminates containing aligned cnts using infrared thermography// *COMPOSITE STRUCTURES*. 2023. No. 324. P. 117557.
5. *Liu W.* Influence of nano-cutting fluid in new cutting and forming processes on heat transfer performance of mechanical engineering // *International Journal of Analytical Chemistry*. 2022. No. 2022. P. 5603355.
6. *Dolmatov D.O., Khairulin A.R., Smolyansky V.A.* Ultrasound tomography using sparse matrix antenna arrays and digital coherent processing with calculations in the frequency domain // *Defektoskopiya*. 2023. No. 5. P. 3—11.
7. GOST R 58062—2018 National standard of the Russian Federation «Fabrics based on carbon fibers». Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200158294> (last appeal 04.03.2024г.).
8. *Caballol David, Raposo Álvaro P., Gil-Carrillo Francisco.* Non-destructive testing of concrete layer adhesion by means of vibration measurement//*Construction and Building Materials*. 12 January 2024. V. 411. P. 134548.
9. *Glushkov E.V., Glushkova N.V., Ermolenko O.A.* Modeling the operation of a non-contact ultrasonic transducer in active wave monitoring systems of thin-walled structures // *Defektoskopiya*. 2022. No. 8. P. 12—24.

10. Bazulin A.E., Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh., Tikhonov D.S., Smotrova S.A., Ivanov V.I. Inspection of samples made of polymer composite materials using ultrasonic antenna arrays // Defektoskopiya. 2022. No. 6. P. 3—16.
 11. Dubinsky S.V., Kazmin E.A., Kovalev I.E., Kornilov A.B., Kornilov G.A., Kostenko V.M., Chernyavsky A.A. Development of vibrothermography as a method of non-destructive testing of products made of polymer structural materials using forced mechanical vibrations // Defektoskopiya. 2021. No. 6. P. 35—45.
 12. Bi Wenda, Zhao Yonghui, Shen Ruiqing, Li Bo, Hu Shufan, Ge Shuangcheng. Multi-frequency GPR data fusion and its application in NDT // NDT & E International. October 2020. V. 115. P. 102289.
 13. Gros X.E., Bousigue J., Takahashi K. NDT data fusion at pixel level // DT & E International. July 1999. V. 32. Is. 5. P. 283—292.
 14. Han Wei, Feng Kan, Yang Huagen. Phase Reversal Method for Damage Imaging in Composite Laminates Based on Data Fusion // Applied Sciences. 2022. V. 12. Is. 6. P. 2894.
 15. Hassani Sahar, Dackermann Ulrike, Mousavi Mohsen, Li Jianchun. A systematic review of data fusion techniques for optimized structural health monitoring // NDT & E International. March 2024. V. 103. P. 102136.
 16. Nomenclature and technical characteristics of IR cameras PI Series (The Precision Line). Access mode: <https://www.optris.com/en/products/infrared-cameras/pi-series/> (last appeal 04.03.2024r.).
 17. Filatov K.A. Methods for identifying pipeline sections on the ground without stripping operations (capillary and ultrasonic methods) // Innovations. The science. Education. 2021. No. 47. P. 1945—1951.
-