

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИК-ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ

© 2021 г. П. Багавач^{1,*}, Л. Крстулович-Опара¹, Ж. Домазет¹

¹ Сплитский университет, ФЭМС, ул. Р. Бошковича, 32, Хорватия,

*E-mail: petra.bagavac@fesb.hr

Поступила в редакцию 16.02.2021; после доработки 08.03.2021

Принята к публикации 23.04.2021

Представлен новый метод разделения подповерхностных дефектов в отвержденных предварительно пропитанных образцах полимера, армированного углеродным волокном (углепластика), на тепловых изображениях, основанный на выделении границ. Исходные данные инфракрасной термографии на отражение каждого образца обрабатывались с помощью нескольких алгоритмов: восстановление теплового сигнала, быстрое преобразование Фурье и анализ главных компонент. Изображения были обработаны для определения поврежденных и неповрежденных участков. Алгоритм определения области сплошности основан на методах выделения границ. Выделение границ позволяет обнаруживать как смоделированные повреждения, так и границы между образцом и фоном на тепловом изображении. В предлагаемом алгоритме границы находятся посредством фильтра Собеля. Границы определяются как переходная зона между поврежденным и неповрежденным материалами. В данной статье алгоритм выделения границ используется как помощник при принятии решения в неразрушающем контроле.

Ключевые слова: фильтрация данных, выделение границ, инфракрасная термография, пропитанные пластины композита из углепластика.

DOI: 10.31857/S0130308221070071

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия все большее внимание уделяется инфракрасному неразрушающему контролю. Основные причины — технологические достижения, в результате которых ИК-камеры имеют более высокую скорость сбора данных, более высокое разрешение и более высокую чувствительность. Инфракрасные камеры используются в пассивной и активной термографии. Пассивная термография чаще всего применяется в медицине, в строительстве (потеря тепла, воздухообмен, определение влажности), на электростанциях (трансформаторы, распределительные устройства, распределение электроэнергии), при обследовании поверхностей, нагруженных трением (двигатели, трансмиссии, другие поверхности трения), обследование резервуаров, трубопроводов и изоляции, в военных целях для наблюдения, спасения, наблюдения за пожарами, археологических раскопок и многого другого [1—3]. А активную термографию — чаще всего для определения свойств материалов, коррозии, неоднородностей в структуре материалов или для обнаружения поврежденных участков [4—6]. В активной инфракрасной термографии задействуют внешние источники тепла, обычно это оптическое возбуждение. Нагрев интересующего объекта осуществляется галогенными лампами, вспышками или лазером. Такие установки широко используются в технологии контроля металлических листов [7, 8] и композитных конструкций [9, 10]. Полученные тепловизионные изображения содержат информацию о внутренней структуре исследуемой поверхности. Подповерхностные нарушения сплошности влияют на скорость диффузии тепла, что приводит к тепловому контрасту на поверхности образца [10]. Собранные данные обычно обрабатываются известными методами обработки тепловизионных изображений: восстановление теплового сигнала, введенная Шепардом [11—15], быстрое преобразование Фурье, которое использовал С. Ibarra-Castanedo [10, 16], и анализ главных компонент, предложенный N. Rajić [17—20]. В последнее время выделение границ дефектов играет важную роль в инфракрасном контроле [21, 22]. Для каждого образца выбирается лучшее изображение, и оно обрабатывается с помощью алгоритма выделения границ. Выделение границ по Собелю, Кэнни, Робертсу, Превитту или лапласиану Гаусса обычно используются в медицинских целях [23—25] или для обнаружения интересующих объектов на фотографиях [26].

В этой статье представлен новый метод разделения подповерхностных дефектов в отвержденных образцах из предварительно пропитанного углепластика на тепловых изображениях, основанный на выделении границ. Предварительно пропитанный углепластик — это термин для предварительно пропитанных композитных волокон, в которых матричный материал, такой как эпоксидная смола, уже введен в волокнистую матрицу таким образом, что он готов к применению, что



Рис. 1. Сборочная линия в автомобилестроении.

упрощает и ускоряет процесс производства. Предварительно пропитанный углепластик позволяет пропитывать волокна на плоской обрабатываемой поверхности или даже в промышленном процессе, а затем придавать пропитанным волокнам такую форму, которую сложно получить при обычных производственных процессах, таких как, например, в методе горячего впрыска. В последнее время наблюдается значительный интерес к предварительно пропитанному углепластику для автомобильных приложений, что подразумевает значительный запрос на неразрушающий контроль изготавливаемых деталей [27—29]. Это исследование связано с проектом, финансируемым автомобильной промышленностью. Образцы имеют одинаковую форму, одинаковое количество слоев и одинаковую ориентацию слоев. Отверждение образцов осуществляется в тех же условиях, что и для автомобильного шасси на производственной линии автомобильного завода. Общей проблемой при производстве является то, что слои материала не отверждаются полностью. При этом образуется слой сухого материала без смолы. В этой статье такая ситуация моделируется тефлоновыми вставками, поскольку тефлон препятствует отверждению слоев. Используются однослойные тефлоновые вставки. Тефлон достаточно тонкий, поэтому он не оказывает существенного влияния на поток тепла через материал [27] и не оказывает большего влияния на тепловое изображение в сравнении с воздушной полостью. Другая проблема — процесс отверждения на краях армирования, например, алюминиевых пластин, используемых в качестве опор для винтов. Между слоями углерода помещены армирующие алюминиевые пластины. Проблема возникает из-за резкого изменения толщины материала. После отверждения пространство между слоями не полностью заполняется смолой, и на этих переходах образуются полости. Эти полости представляют собой опасность при дальнейшей эксплуатации, поскольку они представляют собой трещину/расслоение в области сосредоточенной нагрузки. Это было смоделировано с помощью пластинчатой вставки Согемат®, в которой просверлено отверстие для резкого изменения толщины материала. На рис. 1 показано шасси автомобиля с винтовыми опорами на производственной линии.

2. МЕТОДЫ

В этом параграфе представлен краткий обзор методов, которые будут использоваться для последующей обработки тепловизионных изображений. Метод восстановления термографического сигнала была запатентован в США М. Шепардом [11—13] в 2013 г. Преимущества метода заключаются в сокращении количества данных, устранении шума, сглаживании кривой для того, чтобы она стала дифференцируемой. Основное предположение метода заключается в том, что кривая охлаждения пикселя будет соответствовать одномерному решению уравнения теплопроводности в логарифмическом представлении:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2} \ln(\pi t), \quad (1)$$

где Q — энергия, передаваемая в виде тепла; а t — прошедшее время.

Уравнение (1) справедливо только для полубесконечного тела, когда тепло от полубесконечного тела не передается его окружению. В [3] было показано, что для нескольких первых тепловых

изображений процесс охлаждения следует этому уравнению даже для конечных тел. Шепард предложил [1—3], что термографические данные должны быть записаны как полином m -й степени, полученный путем подбора исходного набора данных:

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_m \ln^m(t). \quad (2)$$

Пиксели термограммы неповрежденной области будут следовать этому решению, в то время как пиксели поврежденной области будут отклоняться от предложенного решения. Оптимизация степени полинома обсуждалась в предыдущих исследованиях [14, 15]. В данной статье используется многочлен пятой степени. Более высокие степени полиномов не привнесли существенных изменений в обнаруживаемости вставок, а уровень шума увеличивался с увеличением степени полинома. Кроме того, в литературе показано, что нечетные степени многочленов находят большее применение в задачах неразрушающего контроля [14, 15].

Сглаженные данные подвергались быстрому преобразованию Фурье (БПФ). БПФ передает данные из временной области в частотную [30, 31]:

$$F_n = \sum_{k=1}^N T(k) e^{\left(\frac{2\pi jkn}{N}\right)} = \text{Re}_n + \text{Im}_n, \quad (3)$$

где j — мнимая единица ($j^2 = -1$); n — увеличение частоты ($n = 0, 1, \dots, N$); N — общее количество тепловизионных изображений; Re и Im — действительная и мнимая части преобразования, из которого можно вычислить амплитуду сигнала A и фазу сигнала ϕ [30, 31]:

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2} \quad \text{и} \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n} \right). \quad (4)$$

Этот метод последовательно сортирует данные по возрастанию частот. Метод БПФ в первую очередь предназначен для обработки периодических повторяющихся сигналов [30]. Поскольку кривая охлаждения является сигналом переходного процесса, необходимо соблюдать особые меры предосторожности при выборе частоты дискретизации и объема данных для обработки, которые напрямую связаны с интервалом времени дискретизации. Для проведения соответствующего отбора данных необходимо выбрать значения двух из этих трех параметров $w(t) = N\Delta t$, где $w(t)$ — это временной интервал; N — общее количество обработанных тепловизионных изображений и $\Delta t = 1/f_s$, а f_s — частота дискретизации. Параметры, выбранные во временной области, напрямую влияют на параметры в частотной области, так что минимальная частота разрешения в частотной области определяется как

$$f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} = \frac{1}{N} f_s. \quad (5)$$

Максимальная частота частотной области будет определена как $f_{\max} = f_s/2$, что известно как частота Найквиста [30]. Более низкие частоты содержат более ценную информацию, а более высокие частоты загрязнены шумом [16, 30]. Поэтому более низкие частоты представляют особый интерес в области ИК-термографии. Желательно выбрать более длительный интервал времени измерения или более высокую частоту дискретизации. Возможности оборудования, такие как максимальная скорость сбора данных, часто являются ограничивающим фактором при выборе значений этих параметров.

Метод БПФ сравнивается с методом термографии главных компонент (ТГК). Метод ТГК очень похож на анализ главных компонент (АГК), с той разницей, что для ТГК сингулярное разложение осуществляется одновременно как по строкам, так и по столбцам [17]:

$$\mathbf{A} = \mathbf{URV}^T, \quad (6)$$

где \mathbf{U} — ортогональная матрица (представляющая набор эмпирических ортогональных функций — ЭОФ) $M \times N$, \mathbf{R} — диагональная матрица $N \times N$, а \mathbf{V}^T — транспонированная матрица $N \times N$.

3. МАТЕРИАЛЫ

Были проконтролированы три предварительно пропитанных образца углепластика с размерами 150×150 мм, представленные на рис. 2. Образец CFRP-T001 состоял из четырех слоев предварительно пропитанных углеродных волокон, дефекты в котором моделировались с помощью тефлоновых вставок.

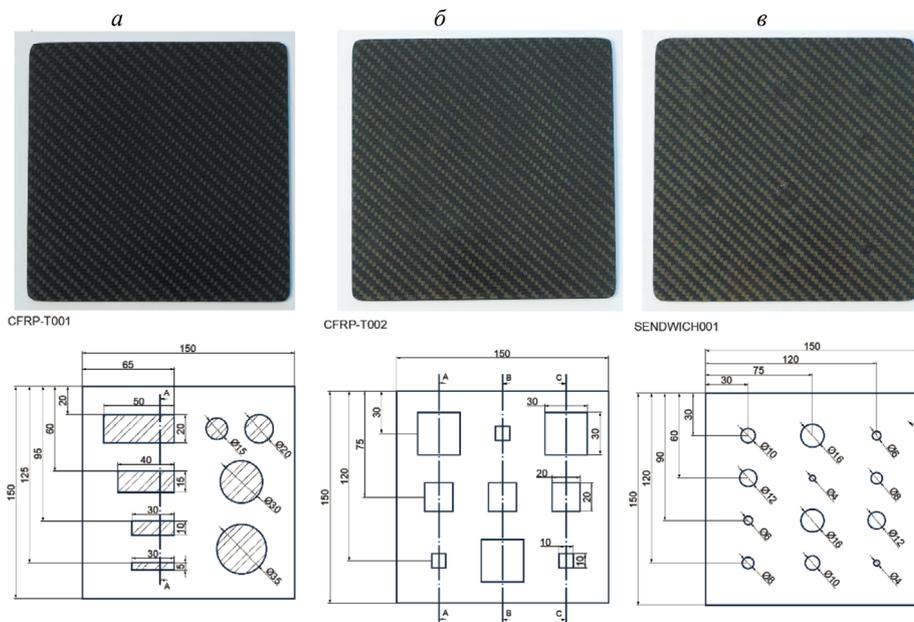


Рис. 2. Образца углепластика: CFRP-T001 (а); CFRP-T002 (б); SENDWICH001 (в).

вок, имеющих различную геометрию (форму и площадь) и расположенных на одной и той же глубине, что показано на рис. 2а. Толщина образца CFRP-T001 составляла 1,9 мм. Тефлоновые вставки имеют квадратную или круглую форму толщиной 0,08 мм каждая. После второго слоя углеродного волокна, расположенного на глубине примерно 1 мм, закладывались тефлоновые вставки. Образец CFRP-T002 состоял из шести слоев, и дефекты были смоделированы тоже в виде тефлоновых вставок с разной геометрией (одинаковой формы, но разной площади) на разной глубине, как показано на рис. 2б. Толщина образца CFRP-T002 составила 2,8 мм. Тефлоновые вставки имели квадратную форму толщиной 0,08 мм каждая. Размеры тефлоновых вставок 30×30, 20×20 и 10×10 мм. После первого, третьего и пятого слоя углепластика укладывались тефлоновые вставки, расположенные на глубине 2,3 мм (поперечное сечение А, левый столбец), 1,4 мм (сечение В, средний столбец) и 0,5 мм (сечение С, правый столбец) соответственно. Образец SENDWICH001 представляет собой многослойный композитный материал, в котором Coremat® был проставлен между четырьмя слоями углепластика, как показано на рис. 2в. Толщина слоя Coremat® составляет 1,5 мм, а общая толщина образца составляет 3,5 мм. Coremat® — это нетканый материал на основе полиэфирных волокон. Он используется в качестве сердцевины для увеличения жесткости без значительного увеличения веса в слоистых материалах, армированных волокном. Coremat® всегда должен быть полностью пропитан смолой. Наиболее важными причинами использования Coremat® являются: отношение веса к жесткости и быстрое наращивание толщины, что увеличивает грузоподъемность без увеличения массы. В образце SENDWICH001 Coremat® изначально просверливались отверстия разного диаметра от 4 до 16 мм. Большинство вставок, встроенных в сэндвич-структуру, видны невооруженным глазом на лицевой стороне образца, как показано на рис. 2в. Этот эффект объясняется различной шероховатостью поверхности и тем, что передняя поверхность слегка вогнута из-за усадки материала в процессе отверждения. Процедура контроля проводилась с помощью инфракрасной камеры, обращенной к задней поверхности образца. Задняя поверхность однородная, без отклонений и шероховатостей, поэтому результаты контроля из-за этого не становятся хуже. Все проконтролированные образцы были изготовлены из предварительно пропитанных углеродных волокон RAW006-010319 SHD DF314-C650-HS-3K-1250 мм, выдержанных 18 ч в автоклаве MAROBO® при 75 °С и давлении 1,5 бар.

Образцы контролировались термографией на отражение. Экспериментальная установка включала в себя инфракрасную камеру FLIR 5000SC, с частотой сбора данных 25 кадров в с, фото вспышку TRIA PRO и импульсный генератор HENSEL, излучающий 6000 Дж за 1/440 с, как показано на рис. 3а. По записанной последовательности тепловых изображений наблюдался временной интервал 10,24 с. Общее количество обработанных тепловизионных изображений для каждого образца составило 256. На рис. 3б показана нормализованная кривая спада температуры для случайного пикселя образца CFRP-T001.

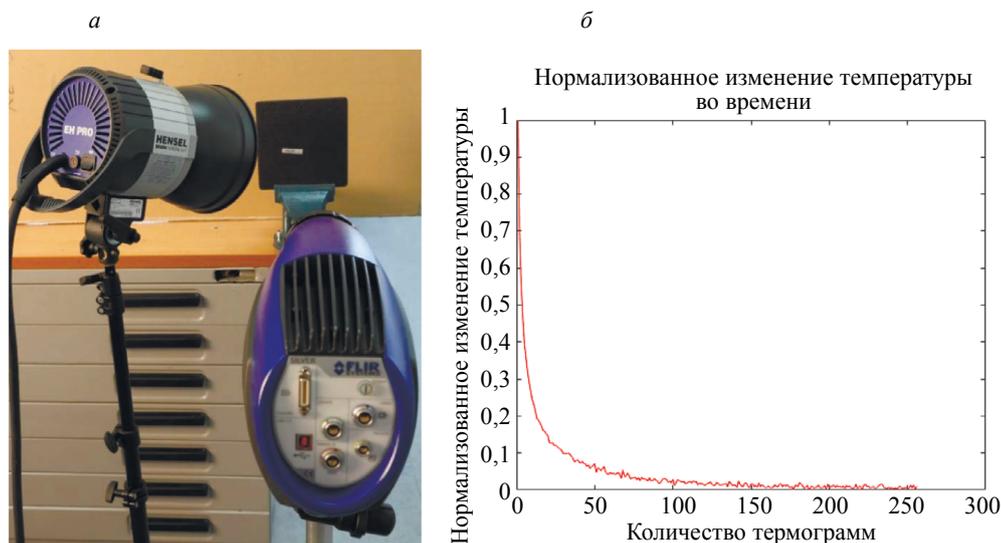


Рис. 3. Экспериментальная установка (а); нормализованная кривая изменения температуры во времени (б).

На рис. 4. представлены первичные тепловые изображения каждого образца с максимальным контрастом. Неоднородности было трудно обнаружить на первичных изображениях, поскольку многочисленные воздействия окружающей среды влияли на тепловой поток от образца к ИК-камере. Этикетка на образце в виде наклейки была приклеена к центральной части образца при производстве и сильно влияла на способность к обнаружению дефектов. Рекомендуется ничего не наклеивать на образцы вообще или, при необходимости, наклеивать на те участки, которые не будут контролироваться тепловой методом НК. То же самое происходит после процедуры удаления перманентного маркера; это также имеет влияние на тепловые изображения.

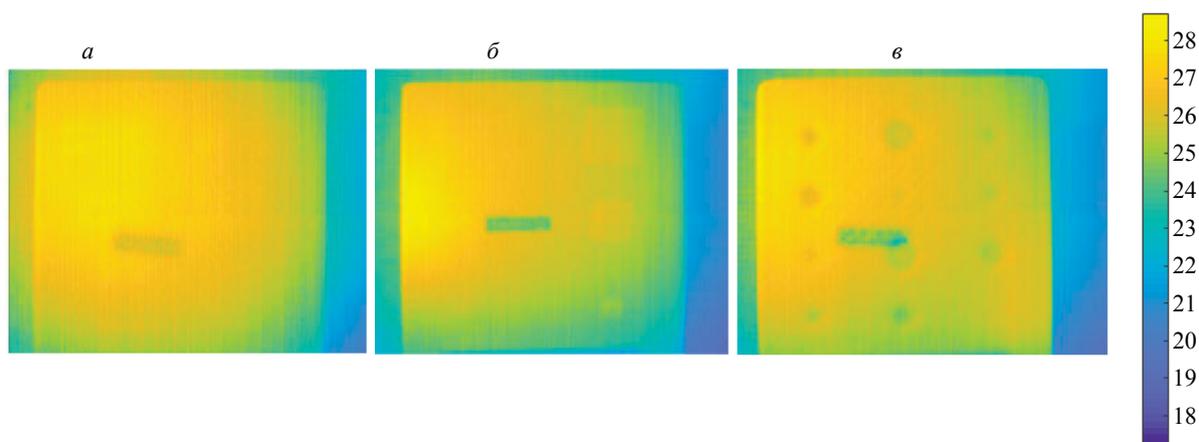


Рис. 4. Первичные термограммы: CFRP-T001 (а); CFRP-T002(б); SENDWICH001 (в).

4. ПОСТОБРАБОТКА ПЕРВИЧНЫХ ТЕРМОГРАММ

Первичные изображения были обработаны с использованием метода восстановления теплового сигнала (ВТС), в котором данные сглаживаются для удаления шума. Для первичных данных был подобран полином пятой степени, поэтому было рассмотрено шесть коэффициентов (a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 и a_6), которые будут характеризовать изображение. Отношение сигнал/шум (ОСШ) рассчитывалось для каждого такого коэффициента. Самое оптимальное ОСШ было получено для коэффициента a_2 . Выбранное изображение показано на рис. 5, столбец 1. Дальнейшая обработка проводи-

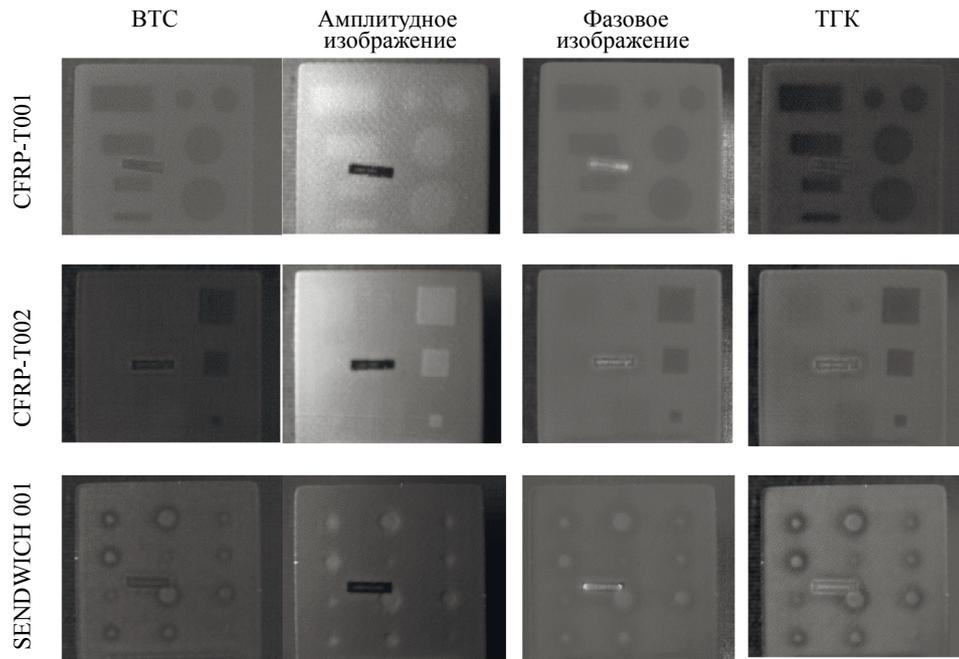


Рис. 5. Термограммы после обработки методами BTC, БПФ (амплитудное и фазовое) ТГК (ЭОФ₂).

лась на данных моделирования. Вместо исходных необработанных данных использовались данные, полученные при расчете коэффициентов полинома 5-й степени. Все участки с тефлоновыми вставками видны на образце CFRP-T001, независимо от размера или формы вставки. На образце CFRP-T002 видны все вставки на глубине 0,5 мм, независимо от их размера. На большей глубине не видны участки ни с большей, ни меньшей площадью поверхности. На образце SENDWICH001 не были обнаружены только дефектные участки наименьшего диаметра ($\varnothing 4$ мм). На этом образце самый большой контраст имеется как раз на границе дефектного участка. Это можно объяснить тем, что перфорированные отверстия были заполнены смолой, и смола имеет примерно такие же тепловые свойства, что и материал образца. Амплитудное изображение и фазовое изображение после применения алгоритма БПФ к данным BTC представлены на рис. 5 (столбец 2 и столбец 3). Оба изображения были выбраны из набора полученных результатов на частоте 0,1953 Гц. Показано большое влияние неравномерного нагрева на амплитудное изображение (см. рис. 5, столбец 2), в то время как фазовые изображения (см. рис. 5, столбец 3) оказались весьма успешными в выявлении смоделированных неоднородностей. В последнем столбце на рис. 5 показаны результаты после применения метода ТГК к данным BTC. Представленный результат — эмпирическая ортогональная функция (ЭОФ₂) показан на рис. 5, столбец 4. На изображениях четко видны края вставок и смоделированный поврежденный участок. Результаты ясны из-за воздействия окружающей среды, а шум устранен. На представленных образцах все моделируемые повреждения выявлены методом ТГК. Дальнейшая обработка будет выполняться на тепловых изображениях, подвергнутых последующей обработке методом ТГК, поскольку при этом достигается наибольшая контрастность (см. рис. 5, столбец 4). В следующем разделе представлены результаты ТГК, которые обрабатываются алгоритмом выделения границ.

5. АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ

Анализ изображений после обработки предоставляется оператору, который должен оценить, вызвана ли разница в интенсивности цвета поверхности дефектом или ухудшением сигнала. Предлагаемый алгоритм выделения границ — это инструмент помощи в принятии решений в неразрушающем контроле. Этот алгоритм был задуман как инструмент проверки по принципу «годен/не годен», который упрощает анализ изображений. Выделение границ позволяет обнаруживать как контуры, так и границы между образцом и фоном на тепловом изображении. Есть несколько типов методов выделения границ. Чаще всего используются методы Собеля, Робертса, Превитта, лапла-

сиан Гаусса (LoG) и алгоритм Кэнни [23, 24, 34]. Выделение границ основано на фильтре Собеля и состоит из нескольких шагов, как показано на рис. 6. Алгоритм применяется к одному изображению за другим. Цветовую палитру изображения необходимо переводить в оттенки серого. На первом этапе алгоритм подчеркивает края с помощью фильтра Собеля. Порог чувствительности для метода Собеля выбирается вручную. Таким образом, алгоритм игнорирует все ребра ниже установленного значения для порога. Оператор Собеля использует два ядра 3×3 , которые свернуты с исходным изображением. Первое ядро применяет функцию градиента к столбцам, а второе — к строкам в матрице изображения [32, 33]:

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times A \quad \text{и} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \times A. \quad (7)$$

В каждой точке изображения величину градиента можно рассчитать как

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (8)$$

Обычно границы определяются как переходные зоны между дефектным и неповрежденным материалом.

Границы обрабатываются математически и формируются в виде замкнутых кривых со сплошной внутренней областью. Кривые определяют границу сплошной закрашенной области. Сплошная область в этом случае считается дефектной. На исследуемой поверхности образца может быть более одного дефектного участка. В предлагаемом методе каждый такой участок можно рассматривать отдельно. Для лучшего отображения различные поврежденные участки окрашены в разные цвета. Алгоритм распознавал поврежденные области, но также отмечал некоторые другие области как дефекты, которые, на самом деле, не были таковыми. Это были, например, части изображения с плохими пикселями, поверхностей с другими коэффициентами излучения или поверхности с иной обработкой поверхности. Были обследованы все участки, обозначенные как поврежденные. Области, размеры которых меньше установленного порогового значения, не принимались во внимание. В зависимости от требований можно настроить чувствительность, выбрав соответствующее пороговое значение. Этот подход может использоваться для участков, являющихся следствием шума, или участков, слишком маленьких, чтобы их можно было рассматривать в качестве дефекта. Размер таких областей можно связать с конкретным критерием приемлемости и пренебречь, если критерий не нарушен. На последнем этапе удаляется фон, чтобы можно было рассчитать площадь повреждения. Предлагаемый алгоритм выделения границ показан на рис. 6.



Рис. 6. Предложенный алгоритм выделения границ.

Алгоритм выделения границ успешно использован для изображений, показанных на рис. 5. В этом исследовании будут представлены изображения из последнего столбца на рис. 5 (ТГК), как описано в пункте 4. Результаты выделения границ показаны на рис. 7. В первом столбце рис. 7 показаны термограммы после применения ТГК-метода. Во втором столбце показаны результаты алгоритма выделения границ. По этим изображениям определяют границу между дефектной и бездефектной областью. Каждая поврежденная область распознавалась алгоритмом как отдельный объект и окрашивалась по-разному. Дефектные участки были должным образом отделены от неповрежденных участков, так что все границы представляли собой замкнутые кривые. Алгоритм также распознал фон образца для его последующего исключения. В последнем столбце участки, признанные дефектными, перекрываются исходным тепловым изображением из первого столбца. Алгоритм в большей степени обнаруживает поврежденные участки. Большинство дефектов в виде ставок были обнаружено, в то время как их меньшее количество осталось необнаруженным, в основном из-за геометрических характеристик тефлоновых вставок и глубины, на которой они

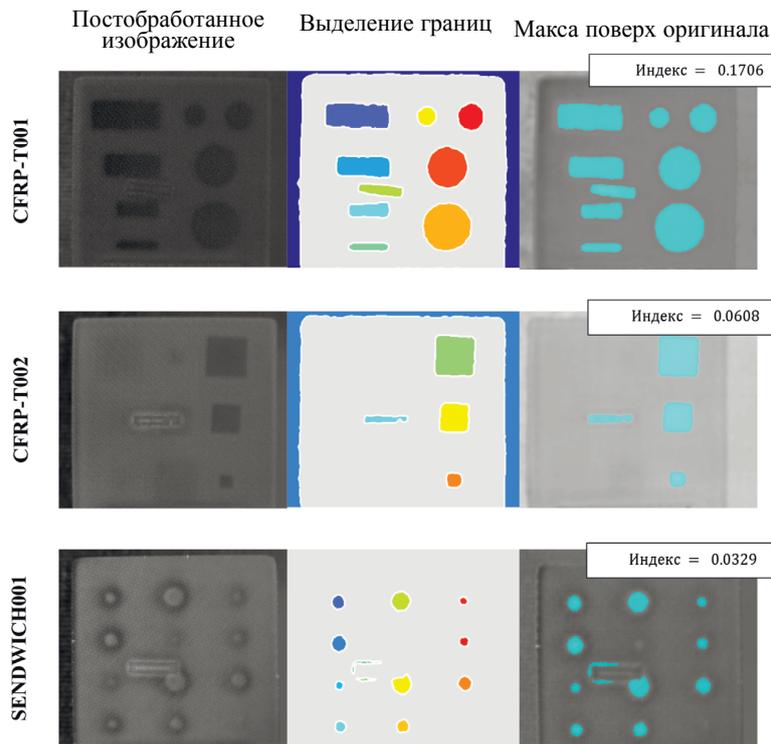


Рис. 7. Обнаруженные дефектные участки после применения алгоритма выделения границ.

были расположены. Авторы считают, что этикетка в виде наклейки на поверхности образца сильно повлияла на результаты. Амплитуда в области вокруг наклейки вызвала ложное смещение среднего арифметического. В результате четкие границы дефекта размывались и не учитывались при определении границ образца.

На следующем этапе результаты оцениваются количественно. Индекс распознавания дефектного участка к общей площади образца определялось как

$$\text{Индекс} = \frac{\text{Количество пикселей дефекта}}{\text{Общее количество пикселей}} \quad (9)$$

Таким образом, установленный индекс сравнивается с реальным таким индексом и индексом выявления. Реальный индекс рассчитывается на основе известной геометрии образца как отношение общей площади вставок к площади образца. Индекс выявления также рассчитывается на основе известной геометрии образца, но с учетом только дефектов, обнаруженных на термограммах. Поверхность наклейки была прибавлена к общей площади дефектов. Таким образом, алгоритм имеет высокий процент обнаружения дефектов (более 90 % для образцов CFRP-T001 и CFRP-T002). Однако если учесть, что поверхность наклейки прибавляется к общей площади дефектов, этот процент становится немного ниже. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количественное сравнение: измеренные индексы и индексы, полученные посредством алгоритма выделения границ (obtained)

	Индекс	Индекс выявления	Реальный индекс
cfrp-t001	0,1706	0,1871	0,1871
cfrp-t002	0,0608	0,0622	0,1867
sendwich001	0,0329	0,0419	0,0430

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм выделения границ по формулам (7), (8) был использован в данной работе. Алгоритм выделения границ объединялся с алгоритмом анализа главных компонент, чтобы улучшить ИК-термографический контроль подповерхностных дефектов. Дефекты моделируются вставкой тефлоновых пластин разного размера на разную глубину. Для использованных образцов с ранее описанной геометрией и смоделированными дефектами можно сделать следующие выводы.

Первичные данные обрабатывались с помощью нескольких алгоритмов: восстановление теплового сигнала, быстрое преобразование Фурье и анализ главных компонент. Наилучший результат был получен с помощью анализа главных компонент. Достигнутый контраст можно улучшить, если использовать двухслойные тефлоновые вставки. Этикетку нельзя размещать в зоне контроля.

Большинство вставок были успешно обнаружены с помощью алгоритма выделения границ. Только некоторые маленькие вставки, которые были расположены на большой глубине, не были обнаружены. Пороговое значение алгоритма выделения границ необходимо регулировать вручную, чтобы определять потенциальные границы для каждой выборки. Авторы будут автоматизировать этот шаг в дальнейших своих исследованиях. Алгоритм будет обновлен известными методами выбора порога, такими как метод Оцу.

После того, как были выделены границы включений (дефектов), алгоритм обнаруживал различные поврежденные участки и удалял фон образца. Этот шаг позволил рассчитать отношение площади дефектной поверхности к общей поверхности образца.

Авторы считают, что таким образом можно снизить субъективность принятия решения оператором. Это может быть первым шагом в автоматизации такого процесса. Таким образом, представленный метод может значительно сократить время контроля и повысить автономность НК.

В дальнейшем авторы обсудят эффективность описанных в статье методов постобработки и эффективность предложенного алгоритма в различных других задачах. Весьма вероятно, что кузов автомобиля, фюзеляж или корпус судна будут подвергаться ударам с низкой или высокой скоростью в течение своего жизненного цикла. Повреждение от удара вызовет перекрытие расщелений на нескольких глубинах. Будет протестировано применение метода обнаружения повреждений от удара.

Работа выполнена при поддержке Rimac-Automobili.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lahiri B.B., Bagavathiappan S., Jayakumar T., Philip John.* Medical applications of infrared thermography // A review. 2012. V. 55(4). doi:10.1016/j.infrared.2012.03.007
2. *Kylili Angeliki, Paris A. Fokaides, Petros Christou, Soteris A. Kalogirou.* Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics // A review. Applied Energy. 2014. V. 134. P. 531—549. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.005
3. *Bagavathiappan S., Lahiri B.B., Saravanan T., Philip John, Jayakumar T.* Infrared thermography for condition monitoring // A review. Infrared Physics & Technology. 2013. V. 60. P. 35—55. doi:10.1016/j.infrared.2013.03.006
4. *Mayr G., Plank B., Sekelja J., Hendorfer G.* Active thermography as a quantitative method for non-destructive evaluation of porous carbon fiber reinforced polymers. 2011. V. 44(7). P. 537—543. doi:10.1016/j.ndteint.2011.05.012
5. *Simonov Denis, Vavilov Vladimir, Chulkov Arseniy.* Infrared thermographic detector of hidden corrosion // Sensor Review. 2020. V. 40(3). P. 283—289. doi:10.1108/sr-12-2019-0322
6. *Lizaranzu Miguel, Lario Alberto, Chiminelli Agustín, Amenabar Ibán.* Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools // Infrared Physics & Technology. 2015. V. 71. P. 113—120. doi:10.1016/j.infrared.2015.02.006
7. *Bagavac Petra, Krstulović-Opara Lovre, Domazet Željko.* Infrared Thermography of Steel Structure by FFT // Materials Today: Proceedings. 2016. V. 12. P. 298—303. doi:10.1016/j.matpr.2019.03.127
8. *Waugh R.C., Dulieu-Barton J.M., Quinn S.* Modelling and evaluation of pulsed and pulse phase thermography through application of composite and metallic case studies // NDT & E International. 2014. V. 66. P. 52—66. doi:10.1016/j.ndteint.2014.04.002
9. *Chrysafi A.P., Athanasopoulos N., Siakavellas N.J.* Damage detection on composite materials with active thermography and digital image processing // International Journal of Thermal Sciences. 2017. V. 116. P. 242—253. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2017.02.017
10. *Ibarra-Castaneda C., Avdelidis N.P., Grenier M., Maldague X., Bendada A.* Active thermography signal processing techniques for defect detection and characterization on composite materials / Proc. of SPIE. V. 7661. Termosense XXXII, 2010. Retrieved from: <https://doi.org/10.1117/12.850733>

11. *Shepard M.* United States Patent No. US 8449176B2, 2013.
12. *Shepard M.* Flash Thermography of Aerospace Composites / IV Conferencia Panamericana se END Buenos Aires — Octobre 2007.
13. *Shepard M.* Characterization of Full Range Time Evolution in Active Thermography. 2014. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2014.178>
14. *Roche J.-M., Passilly F., Balageas D.* A TSR-Based Quantitative Processing Procedure to Synthesize Thermal D-Scans of Real-Life Damage in Composite Structures // Journal of Nondestructive Evaluation. 2015. V. 34(4). P. 41. <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0314-8>
15. *Balageas D., Roche J.-M., Leroy F.-H.* Comparative Assessment of Thermal NDT Data Processing Techniques for Carbon Fiber Reinforced Polymers // Materials Evaluation. 2017. V. 75. P. 1019—1031.
16. *Ibarra-Castanedo C., Maldague X.* Pulsed Phase Thermography Reviewed // QIRT J. 2004. V. 1(1). P. 47—70.
17. *Rajic N.* Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures // Composite Structures. 2002. V. 58. P. 521—528. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00161-7)
18. *Milovanović B., Banjad Pečur I.* Principle component thermography for defect detection in reinforced concrete structures // Conference: Advances in Cement and Concrete Technology in Africa, 2016.
19. *Omar M.A., Parvataneni R., Zhou Y.* A combined approach of self-referencing and Principle Component Thermography for transient, steady, and selective heating scenarios // Infrared Physics & Technology. 2010. V. 53(5). P. 358—362. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.06.004>
20. *Yousefi B., Sfarra S., Ibarra-Castanedo C., Maldague X.P.V.* Comparative analysis on Thermal Non-Destructive Testing Imagery applying Candid Covariance-Free Incremental Principal Component Thermography (CCIPCT) // Infrared Physics & Technology. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.06.008>
21. *Ratsakou Almpion, Skarlatos Anastassios, Reboud Christophe, Lesselier Dominique.* Shape reconstruction of delamination defects using thermographic infrared signals based on an enhanced Canny approach // Infrared Physics & Technology. 2020. V. 111. P. 103527. doi:10.1016/j.infrared.2020.103527
22. *Tse Peter, W. Wang Gaochao.* Sub-surface defects detection of by using active thermography and advanced image edge detection // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 842. P. 012029. doi:10.1088/1742-6596/842/1/012029
23. *Bajwa U.I., Vardasca R., Ring F., Plassmann P.* Comparison of boundary detection techniques to improve image analysis in medical thermography // The Imaging Science Journal. 2010. V. 58(1). P. 12—19. doi:10.1179/136821909X12520525092846
24. *Preben Gråberg Nes.* Fast multi-scale edge-detection in medical ultrasound signals. 2012. V. 92 (10), P. 2394—2408. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.02.021>
25. *Zhao Yu-qian, Gui Wei-hua, Chen Zhen-cheng, Tang Jing-tian, Li Ling-yun.* IEEE 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference — Shanghai, China (2006.01.17-2006.01.18) / 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference — Medical Images Edge Detection Based on Mathematical Morphology. P. 6492—6495. <https://doi.org/10.1109/iembs.2005.1615986>
26. *Lopez-Molina C., De Baets B., Bustince H., Sanz, J., Barrenechea E.* Multiscale edge detection based on Gaussian smoothing and edge tracking // Knowledge-Based Systems. 2013. V. 44. P. 101—111. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.01.026>
27. *Vavilov V., Xingwang G., Wei S., Yingtao L.* Peculiarities of detecting Teflon defect surrogates in CFRP by transient IR thermography. <https://doi.org/10.21611/qirt.2004.019>
28. *Ibarra-Castanedo C., Benitez H., Maldague X., Bendada A.* Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography. 2007. <https://www.researchgate.net/publication/228417761>. 2007
29. *Theodorakeas P., Avdelidis N.P., Ibarra-Castanedo C., Kouli M., Maldague X.* Pulsed thermographic inspection of CFRP structures: experimental results and image analysis tools. Article in Proceedings of SPIE // The International Society for Optical Engineering, 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2044687>
30. *Fourier J.* Theorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides—Partie / Memoires de l'Academie des Sciences 4, 1824. P. 185—555.
31. *Mateljan I.* ARTA Program for Impulse Response Measurement and Real Time Analysis of Spectrum Frequency Response. User Manual, Version 1.0.0, Faculty of Electrical Engineering, University of Split, Electroacoustic Laboratory, Split 2004.
32. *Pratt W.K.* Digital Image Processing. New York: Wiley, 1991. 698 p.
33. *Canny J.* A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V. 8. P. 679—714.
34. *Acharjya P., Das R., Ghoshal D.* Study and Comparison of Different Edge Detectors for Image Segmentation // Global Journal of Computer Science and Technology. 2012.