



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 10

2023



ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 10
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

Е.Г. Базулин, А.В. Гончарский, С.Ю. Романов, С.Ю. Серёжников. Ультразвуковая томография на основе коэффициентной обратной задачи как способ борьбы со структурным шумом 3

Н.Б. Подымова, А.Б. Ермолинский, М.С. Чернов. Неразрушающий контроль локальной микро-
трещиноватости лабораторных образцов минералов акустическим методом с лазерным источником
ультразвука и его верификация методом рентгеновской компьютерной томографии 18

Электромагнитные методы

Ана Каролина Рашадель, Веллингтон Мазер. Электрохимическая реалкализация карбонизиро-
ванной цементной матрицы: исследование характеристик по влиянию времени и плотности тока 28

Радиационные методы

И.А. Кишин, Е.Ю. Киданова, А.С. Кубанкин, В.С. Сотникова. Методика контроля качества кон-
струкционных элементов из легких материалов на основе мягкого рентгеновского излучения 43

Оптические методы

М.Ю. Федотов. Теоретические исследования термокомпенсации результатов диагностики полимер-
ных композитов методом двух оптических волокон 53

По материалам XXXIV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

Д.А. Аджибаев, М.П. Савичев, В.В. Атрощенко. Разработка методики механизированного ультра-
звукового контроля сварных соединений трубопроводов методами фар и ДВМ с применением дефекто-
скопа УСД-60ФР-16/128 66

Т.С. Абрамова, С.А. Бехер. Сравнительные испытания механических характеристик и структуры
базового и инженерного пластиковых филаментов для аддитивного производства 70

В.А. Барат, А.Ю. Марченков, А.Ю. Поройков, М.В. Карпова, В.В. Бардаков. Применение мето-
да акустической эмиссии и цифровой корреляции изображений при выявлении диффузионных прослоек
разнородных сварных соединений 73

И.В. Михайлов, А.Н. Разыграев, Н.П. Разыграев. Ультразвуковой контроль через утолщенную
аустенитную наплавку 76

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КАК СПОСОБ БОРЬБЫ СО СТРУКТУРНЫМ ШУМОМ

© 2023 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, А.В. Гончарский^{2,**}, С.Ю. Романов^{2,***}, С.Ю. Серёжников^{2,****}

¹ООО ЭХО+, Россия 123458 Москва, Технопарк Строгино

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия 119992 Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 4

E-mail: *bazulin@echoplus.ru; **gonchar@srcc.msu.ru;

romanov60@gmail.com; *s2110sj@gmail.com

Поступила в редакцию 18.07.2023; после доработки 31.07.2023

Принята к публикации 01.08.2023

Предлагается использовать метод ультразвуковой томографии, основанный на решении обратной коэффициентной задачи, для уменьшения уровня структурных шумов. Математические модели, используемые в ультразвуковой томографии, хорошо описывают такие физические эффекты как эффекты рефракции, дифракции и перераспределения. Логично ожидать, что реконструкция внутренней структуры металлических образцов с помощью ультразвуковой томографии будет более эффективной по сравнению с методами цифровой фокусировки антенны (ЦФА). В силу нелинейности обратной задачи ультразвуковой томографии используется итерационный MultiStage метод, обеспечивающий сходимость к глобальному минимуму функционала невязки. В статье проведены результаты численных экспериментов по восстановлению изображения внутренней структуры сварного соединения, в котором могут находиться боковые цилиндрические отверстия и модели трещин. Область наплавленного металла представлена в виде участков, построенных по принципу диаграмм Вороного. В каждом участке скорость постоянна и ее значение распределено случайно. В принятой в статье модели структурный шум формируется из-за многократного рассеяния на границах участков с разной скоростью звука. Предполагалось, что антенная решетка располагается на внешней поверхности объекта контроля известной толщины. Полученные результаты показывают, что томографический метод позволяет определять форму и скорость звука в слабоконтрастных отражателях, для которых ЦФА-метод малоэффективен.

Ключевые слова: обратная коэффициентная задача, ультразвуковая томография, ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК), структурный шум, антенная решетка, метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА).

ULTRASOUND TOMOGRAPHY BASED ON THE COEFFICIENT INVERSE PROBLEM AS A WAY TO COMBAT STRUCTURAL NOISE

E.G. Bazulin^{1,*}, A.V. Goncharsky^{2,**}, S.Yu. Romanov^{2,***}, S.Yu. Seryozhnikov^{2,****}

¹ECHO+ LLC, Technopark Strogino, Moscow, 123458, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Vorobyovy Gory, 1, p. 4, Moscow, 119992, Russia

E-mail: *bazulin@echoplus.ru; **gonchar@srcc.msu.ru;

romanov60@gmail.com; *s2110sj@gmail.com

The paper proposes to use the ultrasound tomography method based on the solution of the inverse coefficient problem to reduce the level of structural noise. Mathematical models used in ultrasonic tomography well describe such physical effects as refraction, diffraction and redispersion effects. It is logical to expect that reconstruction of the internal structure of metallic samples using ultrasound tomography will be more efficient compared to digital antenna focusing (DAF) techniques. Due to the nonlinearity of the inverse problem of ultrasound tomography, an iterative MultiStage method is used to ensure convergence to the global minima of the non-convexity functional. The paper presents the results of numerical experiments to restore the image of the internal structure of the welded joint, which may contain lateral cylindrical holes and crack models. The region of the welded metal is represented in the form of sections constructed according to the principle of Voronoi diagrams. In each section the velocity is constant and its value is randomly distributed. In the model adopted in the paper, the structural noise is formed due to multiple scattering at the boundaries of sections with different sound velocity. It was assumed that the antenna array is located on the outer surface of the control object of known thickness. The results obtained show that the tomographic method allows us to determine the shape and speed of sound in low-contrast reflectors, for which the CFA method is ineffective.

Keywords: inverse coefficient problem, ultrasonic tomography, ultrasonic nondestructive testing (NDT), structural noise, antenna array, digital antenna focusing (DAF) method.

DOI: 10.31857/S0130308223100019, EDN: WZDHAY

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК) в настоящее время является широко используемым методом благодаря его высокой чувствительности к основным типам отражателей, таким

как трещины и непровары, и к широкому спектру контролируемых материалов (металлы, пластмассы, композитные материалы и т.д.). Наличие серийно выпускаемых приборов и методик проведения контроля делают УЗК достаточно дешевым. Основными недостатками УЗК являются трудность оценки реального размера отражателя, а также сложность контроля крупнозернистых металлов, которые выделяют в отдельный класс — материалы со структурным шумом [1]. Такие объекты контроля, как чугун с шаровидным графитом, аустенитные сварные соединения с крупными анизотропными зёрнами, можно рассматривать как пример материалов с высоким уровнем структурного шума. В отличие от шума приемной усилительной аппаратуры в материалах со структурным шумом отношение сигнал/шум не увеличивается при увеличении энергии зондирующего сигнала, так как помимо увеличения амплитуды импульсов, рассеянных отражателями, так же увеличивается и амплитуда импульсов, рассеянных на структуре. Ни согласованная фильтрация, ни применение сложных зондирующих сигналов из-за подобия спектров эхосигнала и структурной помехи существенно не повышают отношение сигнал/шум.

Один из способов уменьшения уровня структурного шума является когерентная обработка эхосигналов с целью получения изображения отражателей при использовании антенной решетки, однако и такой подход недостаточно эффективен, так как пространственно-временное распределение эхосигналов, рассеянных отражателями и структурой материала, достаточно близки. В статье [2] предлагается размещать элементы антенной решетки на расстояниях больше, чем радиус корреляции структурного шума, но это приводит к увеличению уровня шума изображения из-за грубого шага антенной решетки. Чем больше размеры антенной решетки и чем короче зондирующий импульс, тем меньше уровень структурного шума [3]. Для уменьшения уровня когерентных помех в радиолокации используют метод декорреляции (выбеливания) [4]. Однако попытка перенести данный подход для целей УЗК на данный момент оказалась недостаточно эффективной [5].

В практике УЗК для восстановления изображения отражателей, по эхосигналам измеренным антенной решеткой, используют метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [6—8]. Однако методу ЦФА присущи недостатки:

1. Метод рассчитывает «поле» точечного отражателя и не учитывает особенности рассеяния на несплошностях разного типа, например, импульс обегания при восстановлении методом ЦФА всегда будет порождать ложный блик.
2. Для эффективного применения метода ЦФА с учетом отражений от границ объекта контроля нужно знать его акустические свойства и иметь информацию о его конструкции.
3. Метод ЦФА не учитывает изменения фазы эхосигнала при преломлении и отражении от границ объекта контроля. Метод инверсного C-SAFT свободен от этого недостатка и позволяет восстановить изображение границ отражателей в виде величины пропорциональной коэффициенту отражения на границе.
4. Метод ЦФА не учитывает изменение формы эхосигнала, возникающее из-за смещения точки формирования изображения от акустической оси призмы и из-за частотно-зависимого затухания в материале объекта контроля.

В последние годы возрос интерес к разработке новых ультразвуковых томографических методов исследований, основанных на решении обратной коэффициентной задачи для волнового уравнения [9—11]. За рубежом данный метод называется Full Waveform Inversion [12]. Решение обратной коэффициентной задачи позволяет восстановить поле скоростей в объекте контроля. Значимые результаты получены в разработке ультразвуковых томографов для диагностики рака молочной железы на ранних стадиях заболевания [13, 14]. Все больше работ, связанных с томографическими схемами исследования, появляется и в области неразрушающего контроля [15, 16]. В работе [17] исследованы возможности классических томографических схем с поворотом объекта на 360 град. Реконструировано поле скоростей объекта, содержащего низкоконтрастные отражатели с разной скоростью продольной волны. Под контрастностью в дальнейшем будем понимать величину вариации скорости продольной волны в пределах образца.

Особенностью обратных задач волновой томографии является их нелинейность, что сильно усложняет их решение в отличие от линейных обратных задач. Наиболее распространенным методом решения коэффициентных обратных задач является минимизация функционала невязки между рассчитанным и экспериментально измеренными эхосигналами. Для скалярных волновых моделей получено представление для градиента функционала невязки, которое вычисляется через решение сопряженной задачи [11]. Основная проблема заключается в том, что из-за нелинейности обратных задачах волновой томографии функционал невязки содержит локальные минимумы, в которых может останавливаться итерационный процесс градиентной минимизации.

Поиск глобального минимума функционалов является хорошо известной проблемой, которой посвящено большое количество работ. В общем случае задача не имеет решения. В отдельных случаях удается достичь успеха благодаря использованию дополнительной физической информации [18]. Авторами настоящей статьи предложен MultiStage метод (MS-метод) как способ приближенного решения обратной задачи. Дополнительной физической информацией, используемой в предложенном методе, является тот факт, что при частотах, стремящихся к нулю, обратная задача волновой томографии сводится к решению линейных интегральных уравнений [19].

Обратная коэффициентная задача позволяет одновременно решать две задачи, чего не может сделать в явном виде метод ЦФА: определить конструкцию объекта контроля и реконструировать его поле скоростей. Поскольку математическая модель хорошо описывает эффекты рефракции, дифракции и перерасеяния на отражателях произвольной формы, восстановленное поле скоростей в идеальном случае не содержит ложных фантомов.

Однако методы ультразвуковой томографии в приложении к неразрушающему контролю металлов имеют ограничение. Традиционно методы томографии хорошо работают при зондировании исследуемого объекта со всех сторон, как это делается, например, в рентгеновской томографии. Но в УЗК типичной ситуацией является возможность доступа только к одной стороне объекта контроля. Если знать форму отражающего дна, то в методах ультразвуковой томографии появляется возможность использования и регистрации импульсов, отраженных от дна. Именно эти импульсы обеспечивают зондирование объекта контроля в режиме на прохождение. Благодаря этому в ультразвуковой томографии возможна реконструкция не только границ отражателей, но и определение поля скоростей внутри них.

Результаты, полученные в статье, базируются на большом количестве численных экспериментов в рамках скалярной волновой модели. Даже в скалярной модели обратные задачи волновой томографии представляются достаточно сложными с вычислительной точки зрения, поскольку объем неизвестных в трехмерном варианте может составлять несколько миллионов. По мнению авторов статьи, возможности ультразвуковых томографических методов, как способа борьбы со структурными шумами, продемонстрированные в скалярной волновой модели, должны сохраниться и в векторных моделях.

2. ПОСТАНОВКА ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

На рис. 1 представлена схема томографического эксперимента с использованием антенной решетки, расположенной непосредственно на поверхности контролируемого сварного соединения. Антенная решетка состоит из 240 элементов размерами 0,3 мм с зазором 0,02 мм. Излучение происходит каждым восьмым элементом, а регистрация происходит всеми элементами антенной решетки. Исследуемый объект содержит боковые цилиндрические отверстия (БЦО) диаметром

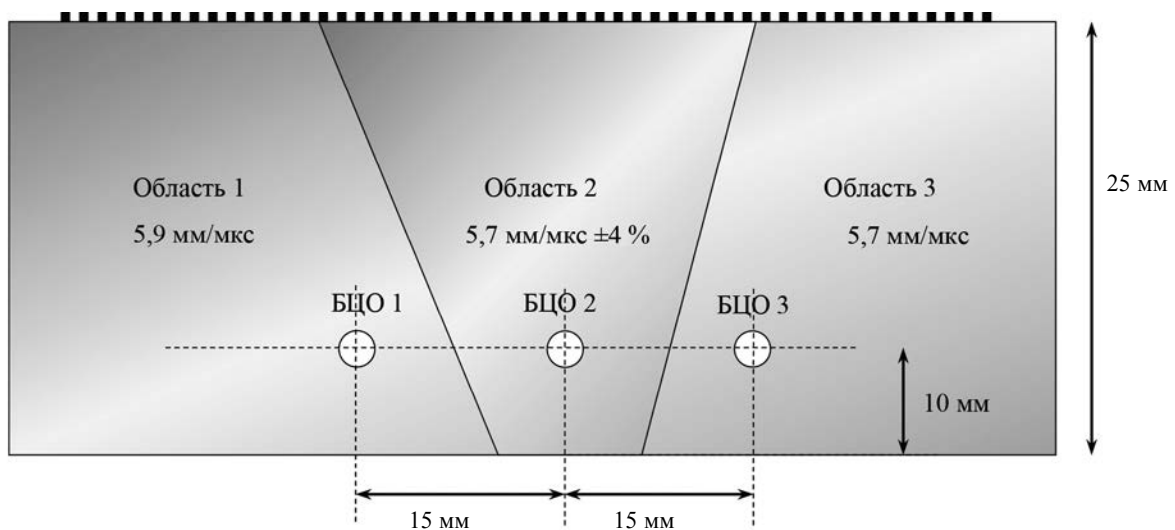


Рис. 1. Схема томографического эксперимента.

2 мм или модели трещин длиной 5 мм с разным контрастом. Структурный шум формируется из-за того, что область наплавленного металла представлена в виде участков, сформированных по принципу построения диаграмм Вороного. В пределах каждого участка скорость постоянна и для каждого участка ее значение распределено случайно.

Особенностью решения обратных задач УЗК является распространение в объекте нескольких волн (продольной, поперечной вертикальной поляризации и т.д.). В данной публикации обратные задачи рассматриваются в скалярной модели, описывающей распространение только одной волны. Будем считать, что волновое поле удовлетворяет волновому уравнению:

$$c(r)u_{rr}(r, t) - \Delta u(r, t) = \delta(r - r_0)g(t), \quad u(r, t = 0) = u_t(r, t = 0) = 0. \quad (1)$$

Здесь $u(r, t)$ — скалярное волновое поле; $r \in R^2$; $c^{-0.5}(r) = v(r)$ — скорость распространения волн; r_0 — координаты точечного источника; $g(t)$ описывает излучаемый источником импульс. Нижняя граница считается известной и на ней ставится условие свободной поверхности. Задача определения $c(r)$ рассматривается как коэффициентная обратная задача, которая в такой постановке является нелинейной [11]. Рассмотрим функционал невязки $\Phi(c)$ [11]:

$$\Phi(c) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \int_0^T (u^{ij}(t; c) - U^{ij}(t))^2 dt.$$

Здесь $u^{ij}(t; c)$ — значения смоделированного волнового поля, полученного путем решения основной задачи (1) при заданном $c(r)$; $U^{ij}(t)$ — данные, регистрируемые детекторами, где j — номер излучающего элемента, i — номер приемного элемента ($i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, M$). Обратная задача состоит в нахождении функции $\bar{c}(r)$, минимизирующей функционал $\Phi(c)$. Известен способ вычисления производной функционала $\Phi(c)$ [11]:

$$\Phi'_c(c) = \int_0^T w_i(r, t) u_i(r, t) dt,$$

где $u(r, t)$ — решение основной задачи (1); $w(r, t)$ — решение сопряженной задачи:

$$c(r)w_{rr}(r, t) - \Delta w(r, t) = u(r, t)|_r - U, \quad w(r, t = T) = w_t(r, t = T) = 0. \quad (2)$$

Для аппроксимации дискретного Лапласиана использована разностная схема 4-го порядка с шаблоном 5×5 точек [20].

Значимым результатом в области волновой томографии является предложенный авторами статьи MS-метод как способ построения приближенного решения обратной задачи. В основе MS-метода лежит априорная физическая информация, а именно, при стремлении центральной частоты зондирующих сигналов к нулю обратная задача становится линейной. Последнее означает, что можно обрезать высокочастотную часть спектра так, что функционал невязки станет выпуклым.

На первом этапе MS-метода используются только низкие частоты зондирующего сигнала, что обеспечивает сходимость итерационного процесса к некоторому приближенному решению с низким разрешением. На втором этапе решение обратной задачи выполняется с полным спектром имеющегося сигнала и с начального приближения, полученного на первом этапе. Такой подход обеспечивает сходимость итерационного процесса и высокое пространственное разрешение. На рис. 2 приведены примеры зондирующих импульсов с центральными частотами 2 и 5 МГц, используемые на первом и втором этапах MS-метода.

Для работы MS-метода необходимо, чтобы зондирующий сигнал содержал низкочастотные компоненты. В предложенном методе зондирование осуществляется широкополосными импульсами, причем низкочастотная часть обеспечивает сходимость итерационного процесса, а высокие частоты отвечают за разрешающую способность.

Методы решения обратных задач волновой томографии как в скалярной, так и в векторной модели хорошо распараллеливаются. Высокая вычислительная сложность этих задач приводит к необходимости использовать суперЭВМ. Наиболее перспективным является использование GPU-платформ [21, 22].

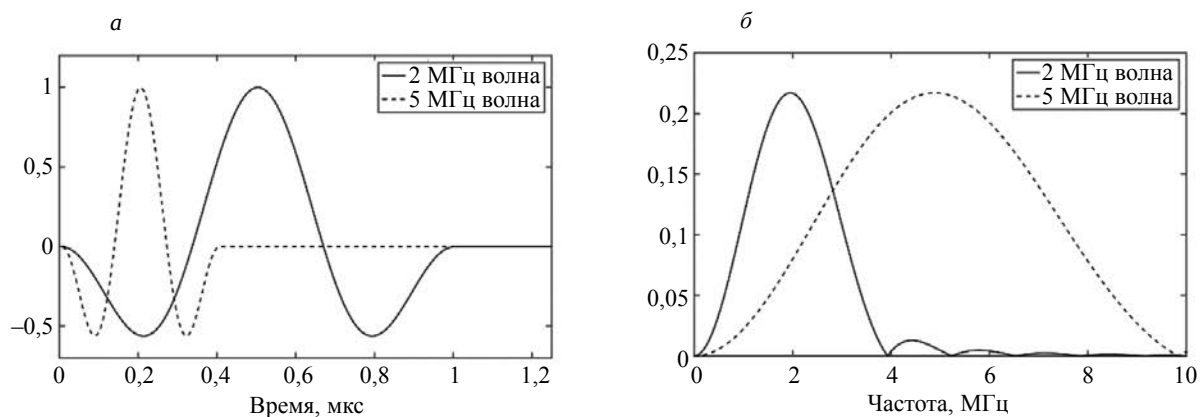


Рис. 2. Форма зондирующих импульсов MS-метода (а) и их частотные спектры (б).

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для исследования эффективности методов ультразвуковой томографии для решения задачи диагностики сварных соединений использовались несколько виртуальных образцов, содержащих как БЦО, так и трещины. Нижняя граница образца считалась известной, и на ней ставилось условие свободной границы. В ультразвуковой томографии по рассчитанным эхосигналам восстанавливалось поле скоростей распространения волны с помощью MS-метода. Для реконструкции использовались два или три этапа. На первом этапе MS-метода объект контроля зондировался импульсами с более низкой центральной частотой, что обеспечивало сходимость итераций. На втором этапе использовалась более высокая центральная частота, и в качестве начального приближения использовалось поле скоростей, полученное на первом этапе.

3.1. Образец с тремя отверстиями бокового сверления

На рис. 3 представлено поле скоростей смоделированного образца. Область 1 (левая часть образца) состоит из металла со скоростью звука, равной 5,9 мм/мкс, а скорость звука в области 3 (правой части) равна 5,7 мм/мкс. Область 2 наплавленного металла в середине содержит «кристаллическую» структуру, сформированную по принципу диаграмм Вороного. Средняя скорость звука в этой области составляет 5,7 мм/мкс, вариация скорости в «кристаллитах» составляет $\pm 4\%$, а их средний размер 0,5 мм. В каждой из областей содержится по одному БЦО диаметром 2 мм. Расчеты проводились для БЦО, заполненных материалом со скоростями звука 5,1 и 3,6 мм/мкс. Шкала справа от рисунков показывает скорость распространения ультразвуковой волны.

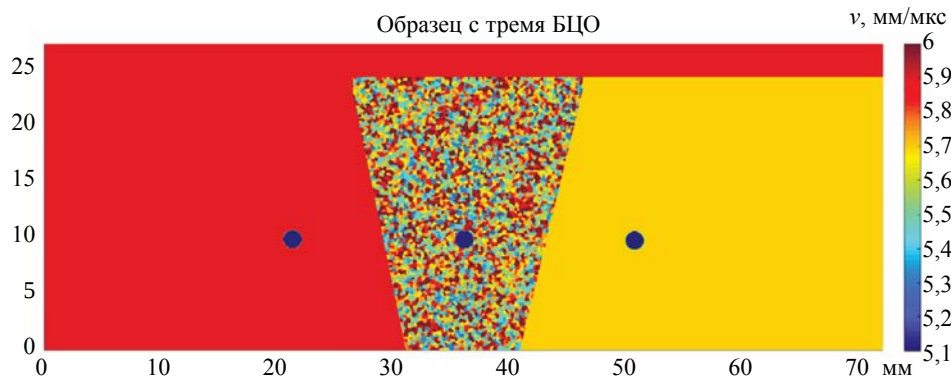


Рис. 3. Поле скоростей образца с тремя БЦО, скорость звука в которых равна 5,1 мм/мкс.

В MS-методе использовались эхосигналы на прямом луче, однократно и двукратно отраженные от дна образца. Схема размещения антенной решетки в модельном эксперименте соответствовала рис. 1. Диаграмма направленности элементов антенной решетки по излучению и приему считается близкой к цилиндрической.

3.1.1. Скорость звука внутри БЦО 5,1 мм/мкс (низкий контраст)

На рис. 4 показано восстановленное MS-методом поле скоростей образца, показанного на рис. 3. На рис. 4а приведено изображение, полученное на первом этапе MS-метода с длиной волны 3 мм. Хорошо определяется средняя скорость в областях 1, 2 и 3. Все три БЦО хорошо локализуются, однако скорость в материале заполнения БЦО отличается от скорости, заданной в образце на рис. 3. На втором этапе MS-метода поле скоростей реконструировано с использованием импульсов с длиной волны 1,2 мм (5 МГц), используя рис. 4а как начальное приближение. Как видно из рис. 4б, реконструированное поле скоростей в БЦО приближается к заданному значению скорости, а структура «кристаллитов» восстановилась с более высокой разрешающей способностью.

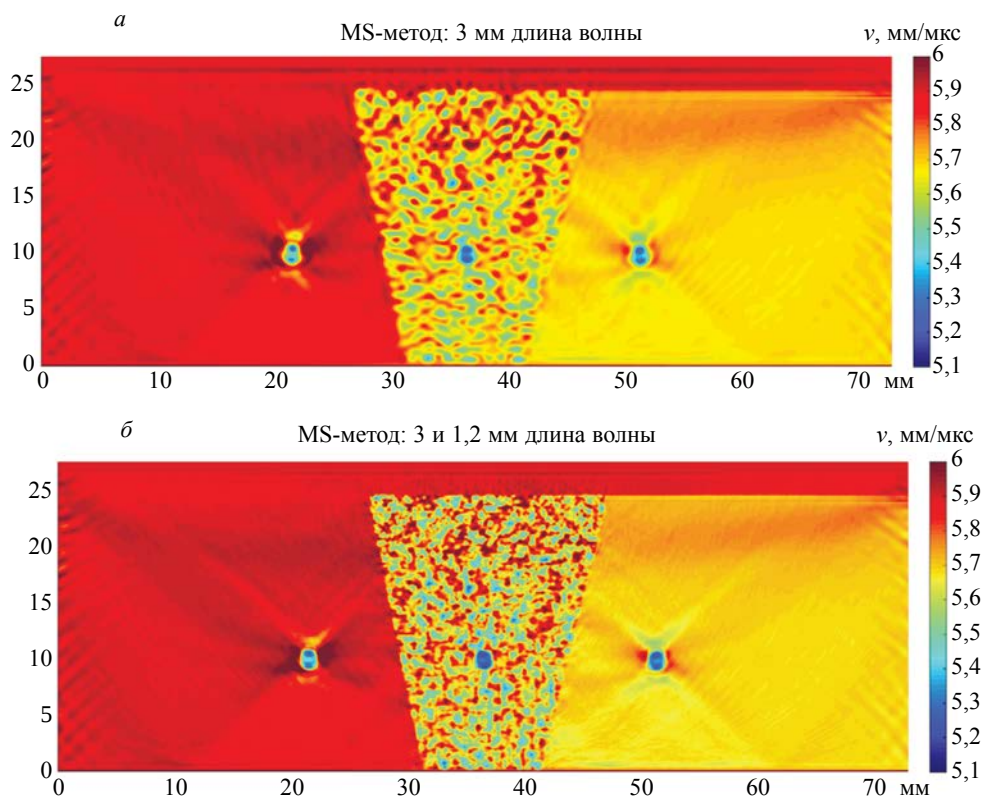


Рис. 4. Восстановленное MS-методом поле скоростей образца с тремя отверстиями БЦО: первый этап с длиной волны 3 мм (а); второй этап с длиной волны 1,2 мм (б).

На рис. 5а приведено изображение отражателей, восстановленное методом ЦФА по акустической схеме на прямом луче для случая однородной среды при расчете лучей в диапазоне углов ± 30 град. Так как волновое сопротивление материала БЦО близко к волновому сопротивлению материала сварного соединения, то блики границы БЦО в основном металле практически незаметны (в отличие от рис. 4), а блика границы БЦО в наплавленном металле не видно вообще. Блик дна меняет глубину из-за того, что скорость в образце предполагается постоянной. По бликам структурного шума можно определить границы области наплавленного металла. На рис. 5б показано изображение, восстановленное при расчете лучей в диапазоне углов ± 60 град. Несмотря на увеличение диапазона углов качество изображения ухудшилось, так как не учитывается неодно-

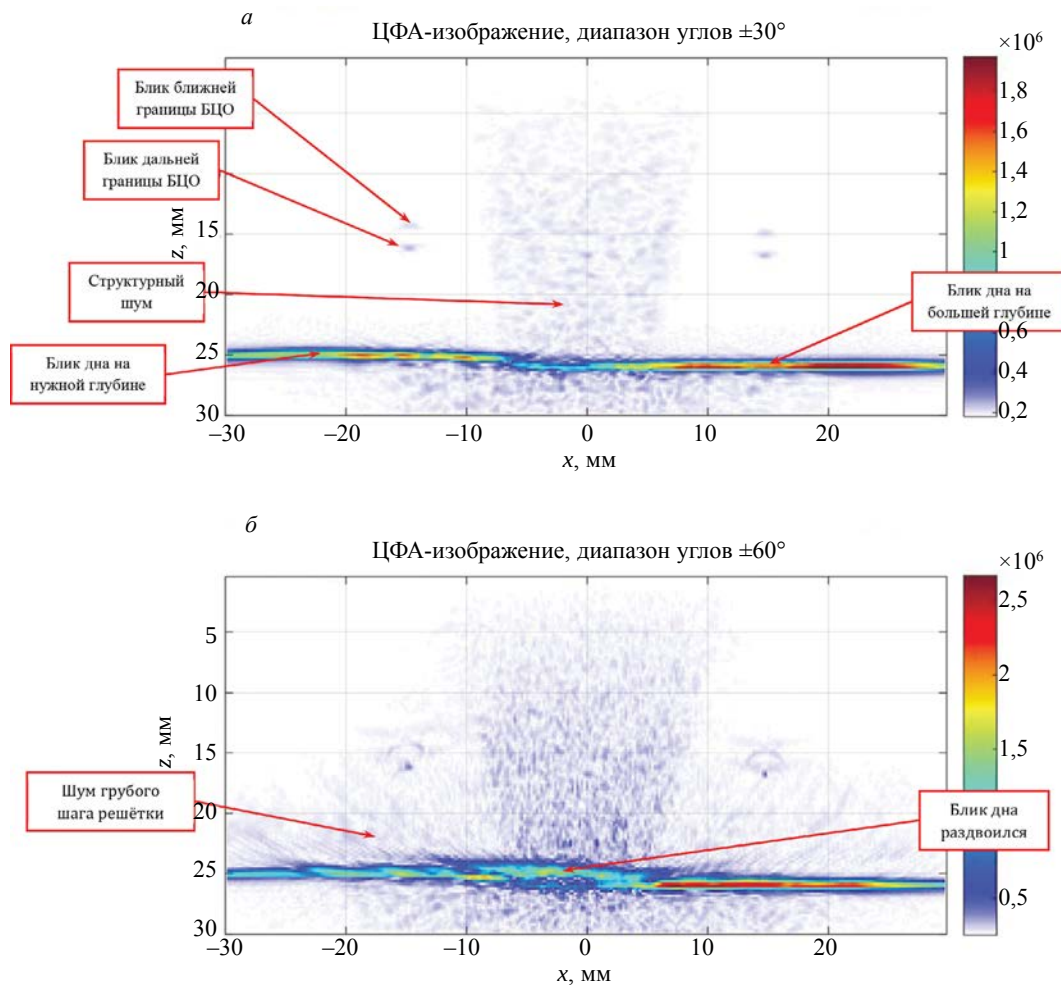


Рис. 5. Изображения отражателей в образце с тремя БЦО, заполненными материалом со скоростью звука 5,1 мм/мкс, восстановленные методом ЦФА: в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ (а); в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ (б).

родность акустических свойств образца: возрос шум у дна образца, видны ближние и дальние границы трещин, которые не лежат на окружности диаметром 3 мм из-за того, что скорости в основном металле в областях 1 и 3 разные, блик дна в области 2 раздвоился. Блики БЦО в наплавленном металле по-прежнему не удастся обнаружить.

3.1.2. Скорость звука внутри БЦО 3,6 мм/мкс (средний контраст)

На рис. 6а показано поле скоростей образца с тремя БЦО с более контрастным материалом заполнения со скоростью звука 3,6 мм/мкс. Для восстановления более контрастного изображения в MS-методе на первом этапе нужно использовать излучение достаточно большой длины волны, равной 5 мм. На рис. 6б, в приведены изображения, восстановленные MS-методом на первом и третьем этапах с длинами волн 5; 2,5 и 1,2 мм. Как видно из рис. 6б, на первом этапе MS-метода определяется локализация отверстий как внутри области наплавленного металла, так и вне его. На рис. 6в приведено реконструированное изображение, полученное на третьем этапе MS-метода с использованием в качестве начального приближения решения, полученного на втором этапе. Как видно из рис. 6в, качество изображения и разрешающая способность улучшаются. Видно, что реконструированная скорость в отверстиях, равная примерно 4,5 мм/мкс, существенно меньше скорости в металле. Дальнейшее повышение частоты в данном случае улучшает лишь изображение кристаллов в верхней части образца.

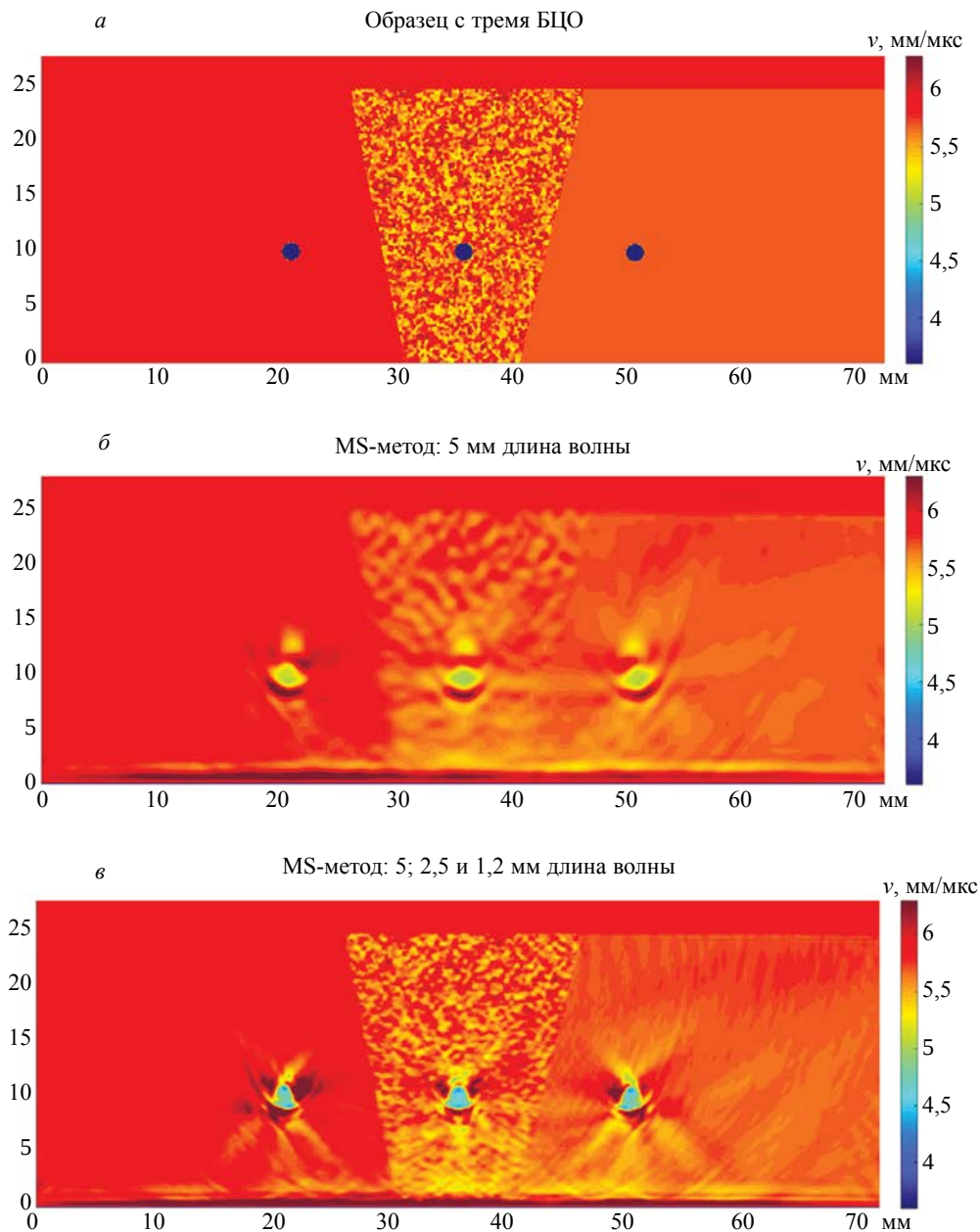


Рис. 6. Образец с тремя БЦО, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс (*a*). Поле скоростей, восстановленное MS-методом на первом (*б*) и третьем (*в*) этапах с длинами волн 5; 2,5 и 1,2 мм соответственно.

На рис. 7*a* приведено изображение образца с тремя БЦО, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс, восстановленное методом ЦФА в диапазоне углов ± 30 град. Из-за уменьшения волнового сопротивления материала в БЦО, в отличие от рис. 5, стали хорошо видны блики части ближней границы БЦО в областях 1 и 3 основного металла, блики дальней границы и блики дальней границы при двукратном отражении импульса внутри БЦО. В наплавленном металле блики границы БЦО 2 стали более заметны, чем на рис. 5. На рис. 7*б* показано ЦФА-изображение, восстановленное при расчете лучей в диапазоне углов ± 60 град. Как и на рис. 5*б*, качество изображения ухудшилось: возрос шум у дна образца, видны ближние и дальние границы трещин, которые не лежат на окружности диаметром 3 мм из-за того, что скорости звука в основном металле слева и справа различаются. Блики границ БЦО 2 в наплавленном металле стали менее заметны.

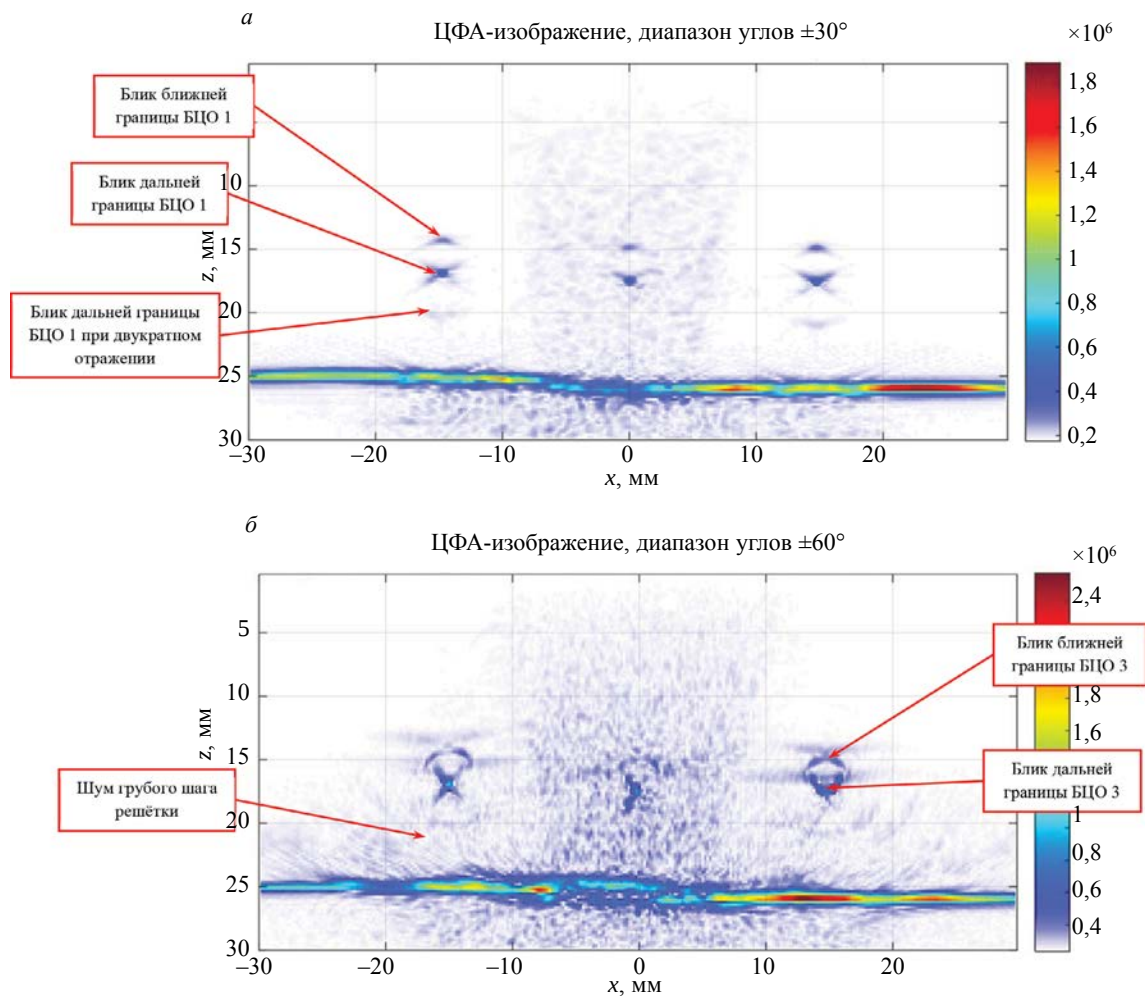


Рис. 7. Изображения отражателей в образце с тремя БЦО, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс, восстановленные методом ЦФА: в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ (а); в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ (б).

3.2. Образец с четырьмя трещинами

Большой интерес для задач неразрушающего контроля представляет обнаружение трещин различной ориентации в сварном соединении.

3.2.1. Скорость звука внутри модели трещины 5,1 мм/мкс (низкий контраст)

На рис. 8 приведено изображение поля скоростей образца с моделями четырех трещин, заполненных материалом со скоростью звука 5,1 мм/мкс. Ширина трещин равна 0,5 мм, а длина — 5 мм. Трещины в основном металле, отмеченные выносками 1 и 4, хорошо видны. Две трещины, расположенные по границе основного и наплавленного металла, отмеченные выносками 2 и 3, практически не заметны даже на идеальном изображении образца. Свойства области наплавленного металла описаны в разделе 3.1.

На рис. 9 приведены реконструированные MS-методом поля скоростей в образце. На рис. 9а показано изображение, полученное на первом этапе с длиной волны 3 мм. Трещины 1 и 4 достаточно хорошо видны. Трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла обнаружить не удастся. На рис. 9б приведено изображение, полученное на втором этапе с длиной волны 1,2 мм. Локализация и точность реконструкции трещин 1, 4 улучшилась и ее можно оценить как четверть длины волны. Трещины 2 и 3 по-прежнему обнаружить не удастся. Восстановленные значения скорости звука в моделях трещин 1 и 4 отличаются от заданных в образце, показанном на рис. 8, примерно на 0,5 мм/мкс.

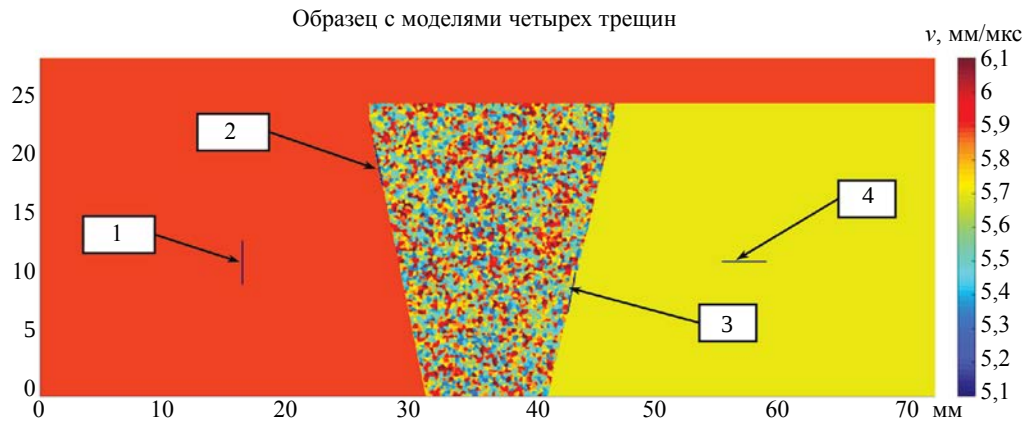


Рис. 8. Поле скоростей образца с моделями четырех трещин разной ориентации. Скорость звука в трещинах составляет 5,1 мм/мкс.

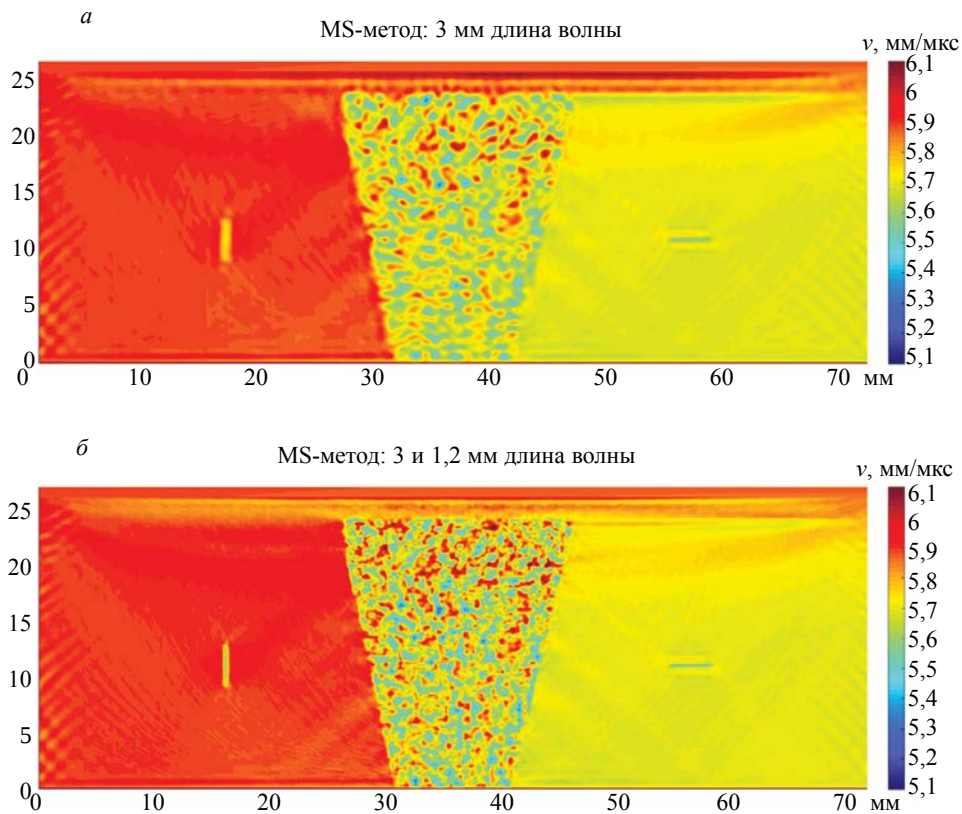


Рис. 9. Восстановленное MS-методом поле скоростей образца с четырьмя трещинами: первый этап с длиной волны 3 мм (*a*); второй этап с длиной волны 1,2 мм (*б*).

На рис. 10*a* приведено изображения образца с четырьмя моделями трещин, заполненными материалом со скоростью звука 5,1 мм/мкс, восстановленное методом ЦФА при расчете лучей в диапазоне углов ± 30 град. Виден блик трещины 4 в области 3, от поверхности которой эхосигналы регистрируются на прямом луче, а от трещины 1 в области 1 остался едва заметный блик нижнего края. Трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла обнаружить не удастся. На рис. 10*б* показано ЦФА-изображение, восстановленное при расчете лучей в диапазоне углов ± 60 град. Возрос шум у дна образца, блик трещины справа раздвоился из-за того, что

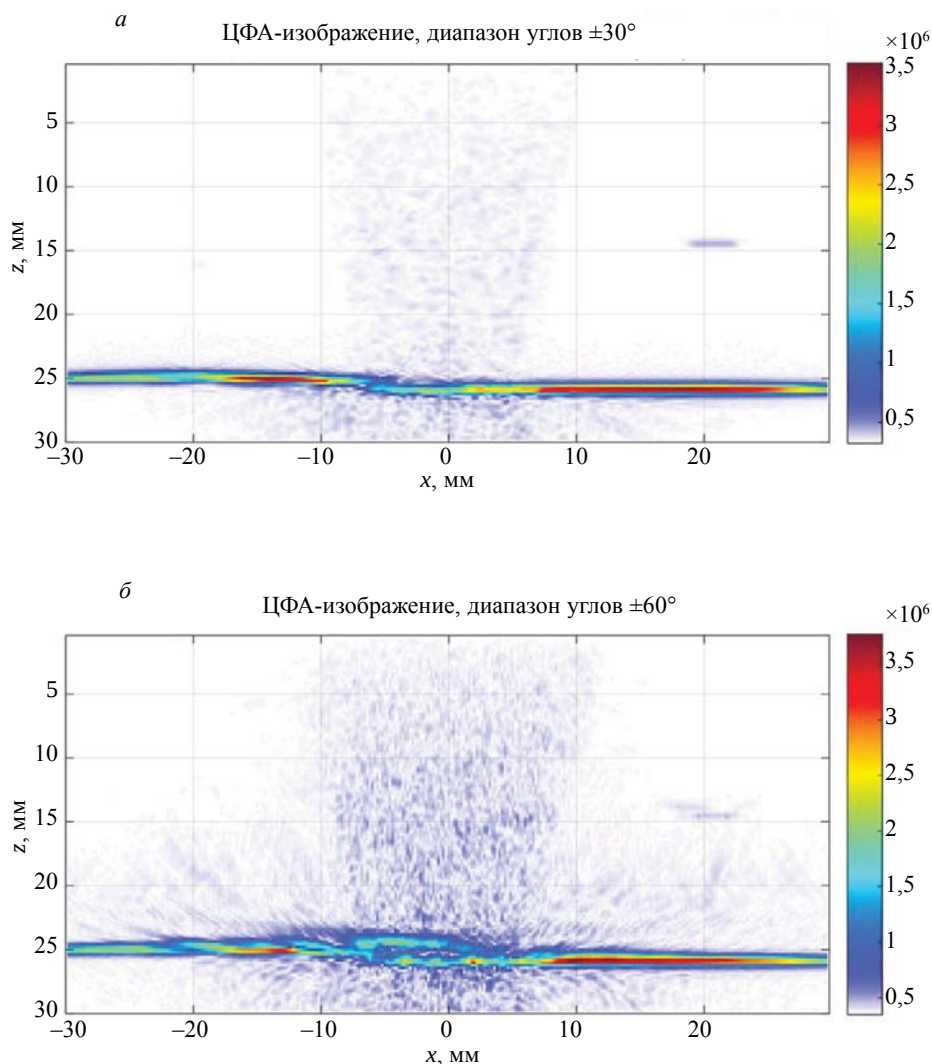


Рис. 10. Изображения отражателей в образце с моделями четырех трещин, заполненных материалом со скоростью звука 5,1 мм/мкс, восстановленные методом ЦФА: в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ (а); в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ (б).

скорости в основном металле слева и справа различаются, блик верхнего края трещины слева раздробился на три. Трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла по-прежнему обнаружить не удастся. Полученное ЦФА-изображение заметно хуже, чем рис. 9б, где можно уверенно обнаружить отражатели в основном металле (трещины 1 и 4) и определить их тип.

3.2.2. Скорость звука внутри модели трещины 3,6 мм/мкс (средний контраст)

На рис. 11а приведено поле скоростей образца с более контрастными трещинами, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс. Как и на рис. 9, обнаружить трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла достаточно сложно. На рис. 11б, в приведены изображения, полученные на первом и втором этапе MS-метода с использованием длин волн 3 и 1,2 мм. Положение трещин и их размеры определяются с точностью до четверти длины волны, и трещины хорошо различимы как в области основного металла, так и на границе основного и наплавленного металла. Скорость звука внутри трещин определяется с ошибкой около 1,5 мм/мкс.

На рис. 12а приведено изображение образца с четырьмя моделями трещин, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс, восстановленное методом ЦФА в диапазоне углов ± 30 град. Из-за уменьшения волнового сопротивления материала в трещинах стал хорошо виден

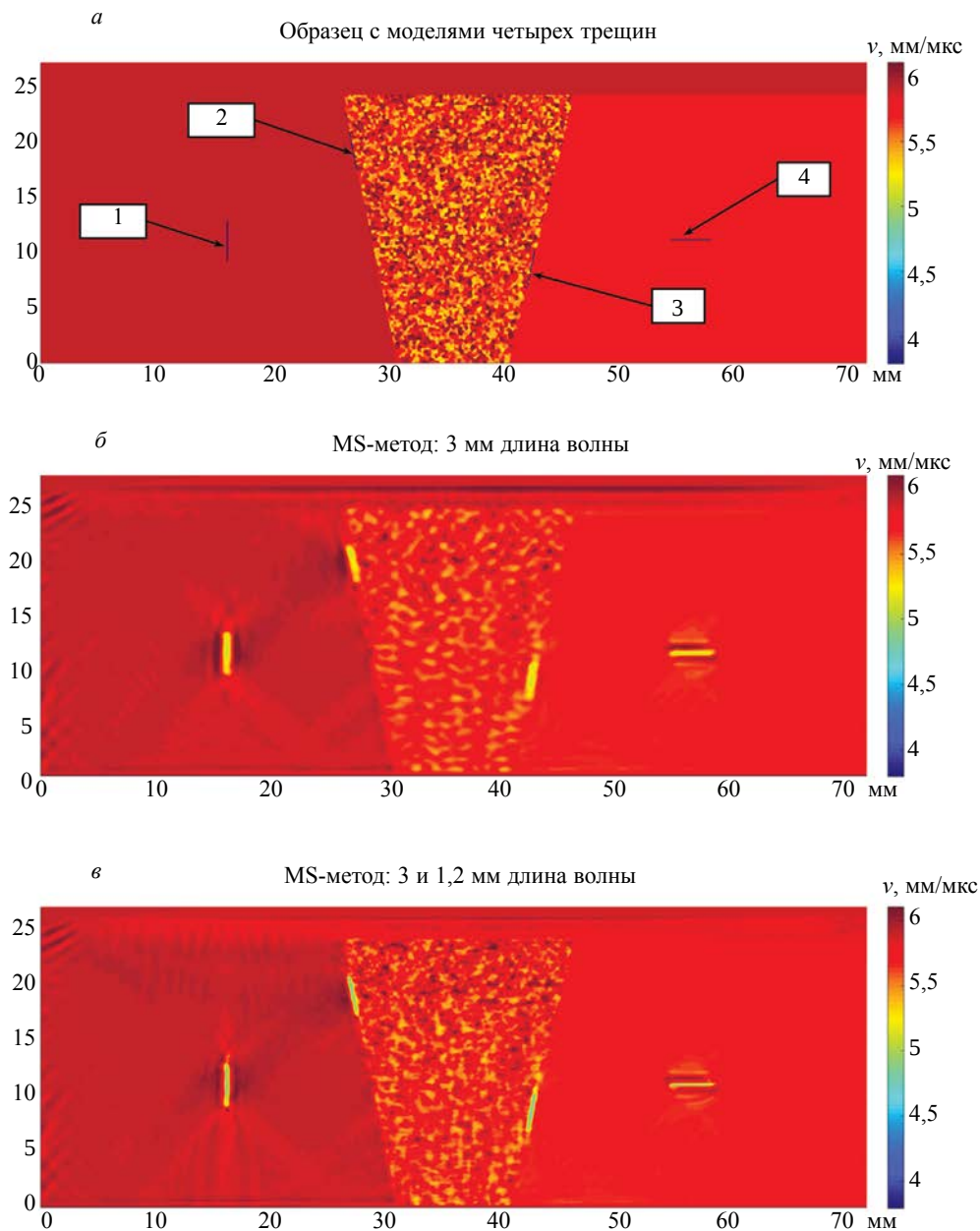


Рис. 11. Образец с четырьмя моделями трещин, заполненными материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс (*а*). Поле скоростей, восстановленное MS-методом на первом (*б*) и втором (*в*) этапах с длинами волн 3 и 1,2 мм соответственно.

блик трещины 4, от трещины 1 остались только дифракционные блики краев, а трещины 2 и 3 на границе основного и наплавленного металла не видны совершенно. На рис. 12*б* изображение получено при расчете лучей в диапазоне углов ± 60 град. Возрос шум у дна образца, блик трещины 4 раздвоился из-за того, что скорости в основном металле слева и справа различаются, блик верхнего края трещины 1 слева раздробился на три. Трещины 2 и 3 обнаружить невозможно. Полученное изображение принципиально хуже приведенного на рис. 11*в*.

В случае наличия валика усиления над областью наплавленного металла невозможно провести измерения эхосигналов, расположив антенную решетку на поверхности образца. Для направления ультразвуковых волн в исследуемую область необходимо использовать призмы с меньшими, чем в металле скоростями звука. При подготовке статьи были проведены численные эксперименты, когда две антенные решетки были размещены на плексигласовых призмах с

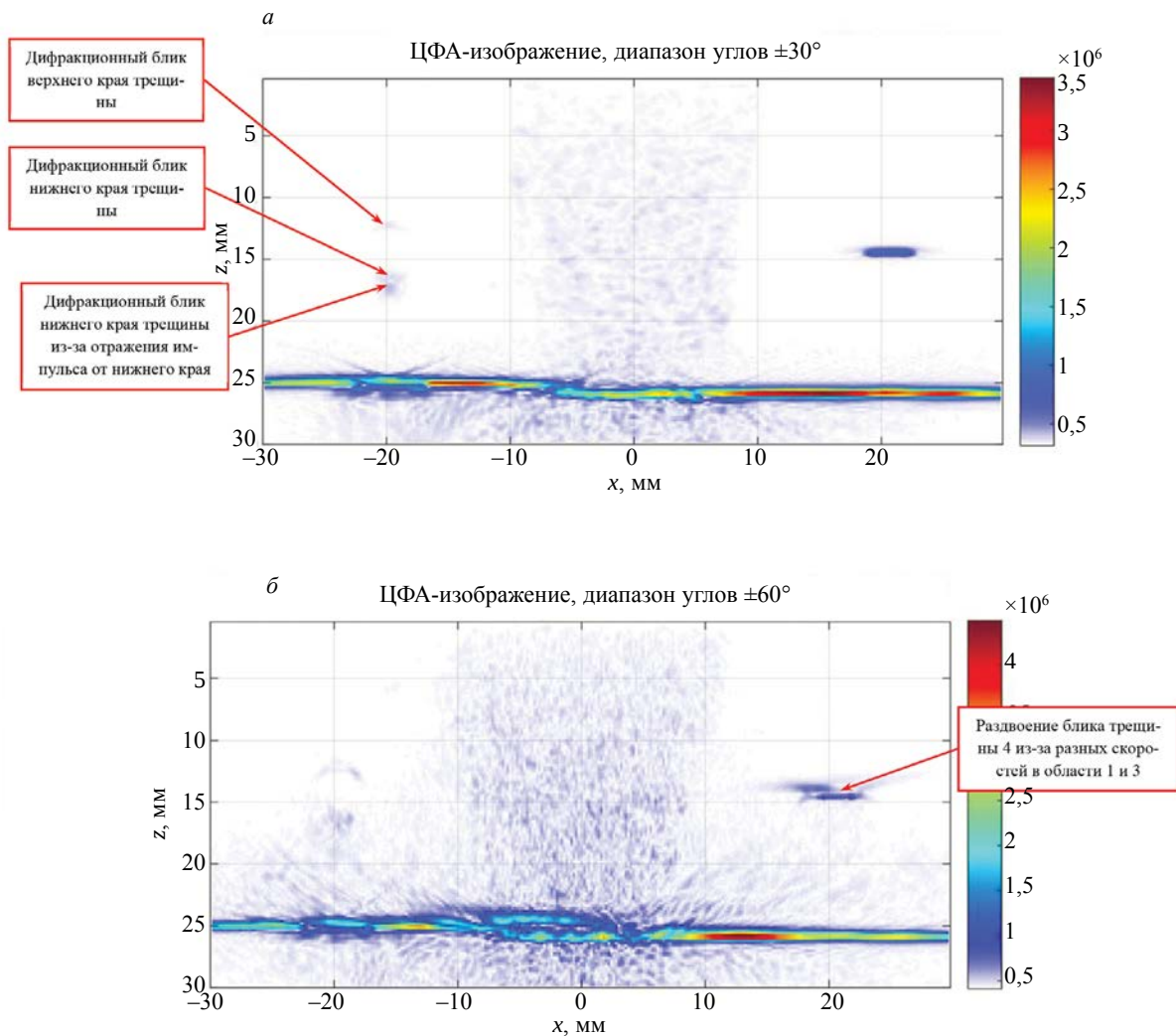


Рис. 12. Изображения отражателей в образце с моделями четырех трещин, заполненных материалом со скоростью звука 3,6 мм/мкс, реконструированное ЦФА методом: в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ (а), в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ (б).

углом наклона 20 град и расположенные над областями 1 и 3 основного металла. Результаты восстановления поля скоростей MS-методом оказались достаточно близкими к тем, что представлены в разделах 3.1 и 3.2, и поэтому они в статье не приводятся.

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

1. Томографический метод, основанный на решении обратной коэффициентной задачи для скалярного волнового уравнения, показал более высокую устойчивость к структурному шуму по сравнению с методом ЦФА за счет учета перерасеяния и восстановления изображения в виде поля скоростей.

2. При малом контрасте отражателей с материалом со скоростью звука, равной 5,1 мм/мкс, MS-метод позволяют не только определить форму отражателей (БЦО или трещина), но и оценить скорость звука в отражателях. В то же время метод ЦФА не позволяет обнаруживать низкоконтрастные отражатели на фоне структурных шумов.

3. При среднем контрасте отражателей с материалом со скоростью звука, равной 3,6 мм/мкс, результаты реконструкции внутренней структуры отражателей методами ультразвуковой томографии значительно превышают по эффективности метод ЦФА. Как показали модельные расчеты, диагностика высококонтрастных отражателей, в которых скорость звука составляет 1 мм/мкс и менее, с помощью методов ультразвуковой томографии приводит к определенным проблемам для MS-метода, связанным со сходимостью итерационного процесса к глобальному минимуму функционала невязки. Применение MS-метода в таких ситуациях требует дополнительных исследований.

4. Представляется актуальной разработка методов решения обратных задач ультразвуковой томографии в векторной модели. Решение прямой задачи принципиальных проблем не представляет, поскольку существуют хорошо разработанные методы для их реализации. Для решения обратной задачи нужно вывести аналитическую формулу для расчета градиента функционала невязки между измеренным и рассчитанным в прямой задаче волновым полем аналогично тому, как это делается в скалярной волновой модели. Эта задача, по мнению авторов, является очень важной и интересной не только с прикладной, но и с чисто математической точки зрения. По мнению авторов статьи, преимущества томографического подхода по сравнению с методом ЦФА при решении задач реконструкции изображения слабоконтрастных отражателей при наличии структурных шумов сохранятся и в векторной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Шалимова Е.В. Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 180 с.
2. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
3. Ермолов И.Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1965. № 6. С. 51—61.
4. Тяпкин В.Н., Фомин А.Н. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Красноярск: СФУ, 2011. 536 с.
5. Базулин Е.Г., Коновалов Д.А. Применение процедуры выбеливания эхосигналов для уменьшения уровня структурного шума при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 3—15.
6. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. № 1 (51). Март 2011. С. 64—70.
7. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Postprocessing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for nondestructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
8. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.
9. Beilina L., Klivanov M.V., Kokurin M.Y. Adaptivity with relaxation for ill-posed problems and global convergence for a coefficient inverse problem // J. Math. Sci. 2010. V. 167. P. 279—325. DOI: 10.1007/s10958-010-9921-1
10. Natterer F. Possibilities and limitations of time domain wave equation imaging / In: Contemporary Mathematics. 2011. V. 559 (Providence: American Mathematical Society). P. 151—162.
11. Goncharsky A.V., Romanov S.Y. Supercomputer technologies in inverse problems of ultrasound tomography // Inverse Probl. 2013. V. 29. P. 075004.
12. Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Geophysics. 2009. V. 74. P. WCC127—WCC152.
13. Marty P., Boehm C., Fichtner A. Acoustoelastic full-waveform inversion for transcranial ultrasound computed tomography // Proc. SPIE. Medical Imaging: Ultrasonic Imaging and Tomography. 2021. V. 11602. P. 1160211. <https://doi.org/10.1117/12.2581029>
14. Ruiter N.V., Zapf M., Hopp T., Gemmeke H., van Dongen K.W.A. USCT data challenge // Proc. SPIE. Medical Imaging: Ultrasonic Imaging and Tomography. 2017. V. 10139. P. 101391N. <https://doi.org/10.1117/12.2272593>
15. Tran K.T., Jalinoos F., Nguyen T.D., Agrawal A.K. Evaluation of Bridge Abutment with Ultraseismic Waveform Tomography: Field Data Application // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. V. 38. P. 95.
16. Seidl R., Rank E. Iterative time reversal based flaw identification // Computers & Mathematics with Applications. 2016. V. 72. P. 879—892.
17. Bazulin E., Goncharsky A., Romanov S., Seryozhnikov S. Ultrasound transmission and reflection tomography for nondestructive testing using experimental data // Ultrasonics. 2022. V. 124. P. 106765. DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106765

18. *Goncharsky A.V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y.* Multistage Iterative Method to Tackle Inverse Problems of Wave Tomography // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2022. V. 9. P. 87—107.
 19. *Кокурин М.Ю.* О редукции нелинейной обратной задачи для гиперболического уравнения на плоскости к линейному интегральному уравнению // *Вычислительные методы и программирование*. 2009. № 3. С. 300—305.
 20. *Hamilton B., Bilbao S.* Fourth-order and optimised finite difference schemes for the 2-D wave equation / In: *Proc. of the 16th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-13)*. Springer. 2013. P. 363—395.
 21. *Kim K.H., Park Q.H.* Overlapping computation and communication of three-dimensional FDTD on a GPU cluster // *Comput. Phys. Commun.* 2012. V. 183. P. 2364—2369.
 22. *Labyed Y., Huang L.* Toward real-time bent-ray breast ultrasound tomography using GPUs / In: *Medical Imaging, Proc. of SPIE*. 2014. V. 9040. P. 90401N.
-

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ МИКРОТРЕЩИНОВАТОСТИ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ МИНЕРАЛОВ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ЛАЗЕРНЫМ ИСТОЧНИКОМ УЛЬТРАЗВУКА И ЕГО ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2023 г. Н.Б. Подымова^{1,*}, А.Б. Ермолинский^{1,**}, М.С. Чернов^{1,***}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия 119991 Москва, Ленинские горы, 1

E-mail: *npodymova@mail.ru; **andrermolinskiy@mail.ru; ***chernov@geol.msu.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023; после доработки 02.08.2023

Принята к публикации 03.08.2023

Предложена акустическая методика неразрушающего контроля степени локальной концентрации микротрещин (микротрещиноватости) в лабораторных образцах минералов на основе лазерной генерации ультразвука. Измеряется спектральная мощность широкополосных сигналов продольных ультразвуковых волн, генерируемых при поглощении импульсного лазерного излучения в специальном материале — лазерном источнике ультразвука и рассеянных на микротрещинах в образцах (так называемая мощность структурного шума). Для полевых шпатов двух типов с неравномерным объемным распределением микротрещин получена прямая зависимость между увеличением микротрещиноватости и возрастанием мощности структурного шума в прозвученных участках образцов. Впервые независимым методом рентгеновской компьютерной томографии образцов сложной формы получено подтверждение достоверности результатов акустических измерений. Установленная связь между локальной микротрещиноватостью и мощностью структурного шума может использоваться в системах мониторинга процесса трещинообразования в горных породах и минералах при воздействии различных нагрузок.

Ключевые слова: лазерная генерация ультразвука, полевые шпаты, микротрещины, рассеяние акустических волн, мощность структурного шума, рентгеновская компьютерная томография.

NONDESTRUCTIVE TESTING OF LOCAL MICROCRACKING IN LABORATORY MINERAL SAMPLES USING AN ACOUSTIC TECHNIQUE WITH A LASER SOURCE OF ULTRASOUND AND ITS VERIFICATION WITH X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY

N.B. Podymova^{1,*}, A.B. Ermolinskiy^{1,**}, M.S. Chernov^{1,***}

¹Moscow State University, Russia, 119991 Moscow, Leninskie Gory, 1

E-mail: *npodymova@mail.ru; **andrermolinskiy@mail.ru; ***chernov@geol.msu.ru

An acoustic technique of nondestructive testing of a local microcracking degree in laboratory mineral samples is proposed based on laser generation of ultrasound. A spectral power of broadband signals of longitudinal ultrasonic waves is measured, which are generated by absorption of pulsed laser radiation in a special material served as a laser source of ultrasound and further scattered on microcracks in samples (the so called structural noise power). The direct relationship between an increase in microcracking and a growth in the structural noise power in scanning regions of the samples has been obtained for feldspars of two types. For the first time, an independent method of X-ray computer tomography of the complex-shaped samples confirmed the reliability of the results of acoustic measurements. The established relationship between the local microcracking and structural noise power can be used in the monitoring systems for observing the crack formation in rocks and minerals under different external loadings.

Keywords: laser generation of ultrasound, feldspars, microcracks, scattering of acoustic waves, structural noise power, X-ray computer tomography.

DOI: 10.31857/S0130308223100020, EDN: WZNILK

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методик оперативного контроля трещинообразования в массивах горных пород является актуальной для оценки технического состояния сооружений критической инфраструктуры с целью решения задачи прогнозирования катастрофических разрушений, а также для верификации феноменологических теорий разрушения горных пород при воздействии различных внешних нагрузок. Трещиноватость горных пород и минералов, неравномерно распределенная по объему, сильно влияет на их прочностные характеристики и определяет деформационную стабиль-

ность и характер разрушения таких материалов при воздействии внешних нагрузок [1—5]. Поэтому задача обнаружения мест локализации микротрещин в геоматериалах на потенциально опасных объектах инженерной инфраструктуры (шахтах, горных выработках, туннелях) является весьма актуальной для прогнозирования безопасной работы таких объектов. Также необходимой является разработка методик on-line контроля эволюции и процесса распространения микротрещин при воздействии различных нагрузок (механических, тепловых, и т.д.).

Контроль трещинообразования в процессе нагружения геоматериалов успешно осуществляется с использованием методов регистрации сигналов акустической эмиссии в исследуемых образцах (см., например, [6—9]). Эти методы позволяют обнаруживать очаги зарождения и локализации микротрещин и наблюдать динамику их распространения в образцах в процессе механического нагружения. Для получения динамической картины эволюции трещиноватости по сигналам акустической эмиссии необходима предварительная информация о распределении микротрещин в исходных образцах, получаемая обычно по данным рентгеновской компьютерной томографии.

В настоящее время для неразрушающего контроля степени трещиноватости геоматериалов и горных пород широко используют измерения скоростей ультразвуковых волн различных типов, а также методики контроля изменения спектрального состава ультразвуковых импульсов при прохождении через трещиноватый геоматериал [3, 5, 10—15]. Основным недостатком методик измерения скоростей и затухания акустических волн является требование плоскопараллельности образцов для прецизионного определения их толщины (для продольных и сдвиговых волн) или данные о точном расстоянии, проходимом волной в образце (для поверхностных волн). Однако такие требования не всегда могут быть выполнены при исследовании образцов геоматериалов сложной формы, в частности, в полевых условиях. Для преодоления этого недостатка разработаны методики анализа временных и спектральных характеристик ультразвуковых импульсов, рассеянных на структурных неоднородностях исследуемых образцов и зарегистрированных при одностороннем доступе к образцу (так называемый «структурный шум») [16—21]. Известно, что эффективность рассеяния ультразвуковых волн на различных структурных неоднородностях, например, зернах или микротрещинах в геоматериалах, существенно зависит от соотношения размеров этих неоднородностей и длины зондирующей ультразвуковой волны [22]. Поскольку размеры трещин в образцах геоматериалов, исследуемых в лабораторных условиях, как правило, меняются в диапазоне от десятков микрометров до единиц миллиметров, для их эффективного ультразвукового контроля необходимо применять зондирующие импульсы с частотным спектром от сотен килогерц до десятков мегагерц [23]. Кроме того, эти импульсы должны иметь амплитуду достаточную для надежной оценки структуры неоднородных геоматериалов, которые могут эффективно поглощать и рассеивать ультразвук в данном частотном диапазоне.

Генерация мощных ультразвуковых импульсов в широком частотном диапазоне для неразрушающей оценки структуры геоматериалов может успешно осуществляться с использованием лазерного оптико-акустического эффекта [24]. При поглощении лазерных импульсов в специальном материале (так называемом лазерном или оптико-акустическом источнике ультразвука) происходит нестационарное тепловое расширение приповерхностной области материала источника, приводящее к возбуждению акустических импульсов с амплитудой до десятков и сотен атмосфер при их наносекундной длительности. Эти параметры определяются характеристиками поглощенного лазерного импульса, а также коэффициентом поглощения света и теплофизическими свойствами материала источника ультразвука. Высокая амплитуда и малая длительность лазерно-возбуждаемых акустических импульсов дают возможность применять их для количественной оценки разномасштабных структурных неоднородностей в твердых телах по анализу характеристик поглощенных или рассеянных акустических волн (см., например, [25—29]).

Целью настоящей работы является разработка методики неразрушающего контроля локальной концентрации микротрещин в лабораторных образцах минералов с использованием лазерной генерации ультразвука. Измеряется спектральная мощность широкополосных акустических импульсов, обратно рассеянных микротрещинами в области прозвучивания образца (мощность структурного шума), и анализируется связь между величиной этой мощности и локальной микротрещиноватостью. В отличие от предыдущей работы [30] по этой же тематике, в настоящей работе впервые объективная верификация предлагаемой ультразвуковой методики осуществляется независимым методом рентгеновской компьютерной томографии образцов сложной геометрической формы с использованием специальной техники высококонтрастной обработки рентгеновских изображений зон с максимальной концентрацией микротрещин в образцах.

ИССЛЕДОВАННЫЕ ОБРАЗЦЫ МИНЕРАЛОВ

В качестве исследуемых минералов были взяты два образца ортоклаза (калийный полевой шпат $K[AlSi_3O_8]$) и один образец плагиоклаза (член изоморфного ряда $NaAlSi_3O_8$ (30–50 %) — $CaAl_2Si_2O_8$ (50–70 %)) [31]. Полевые шпаты являются наиболее распространенными породообразующими минералами, а также — одним из основных компонентов различных типов гранитов и других природных строительных материалов. Эти минералы имеют слоистое строение из тонких пластинчатых кристаллов и характеризуются наличием локализованных очагов скопления трещин с характерными размерами от десятков до сотен микрометров. В образцах миллиметровой толщины места скопления микротрещин в объеме могут быть обнаружены при просвечивании образцов видимым светом. Фотографии исследуемых образцов толщиной H и оптические изображения исследуемых зон с выходом микротрещин на поверхность образцов представлены на рис. 1. Таким образом, были визуально определены возможные зоны максимальной концентрации микротрещин в объеме образцов. Номера этих зон указаны цифрами 1 и 2 на фотографиях и оптических изображениях на рис. 1. Затем были проведены исследования внутренней структуры этих зон с использованием рентгеновской компьютерной томографии и предлагаемого акустического метода с лазерной генерацией ультразвука.

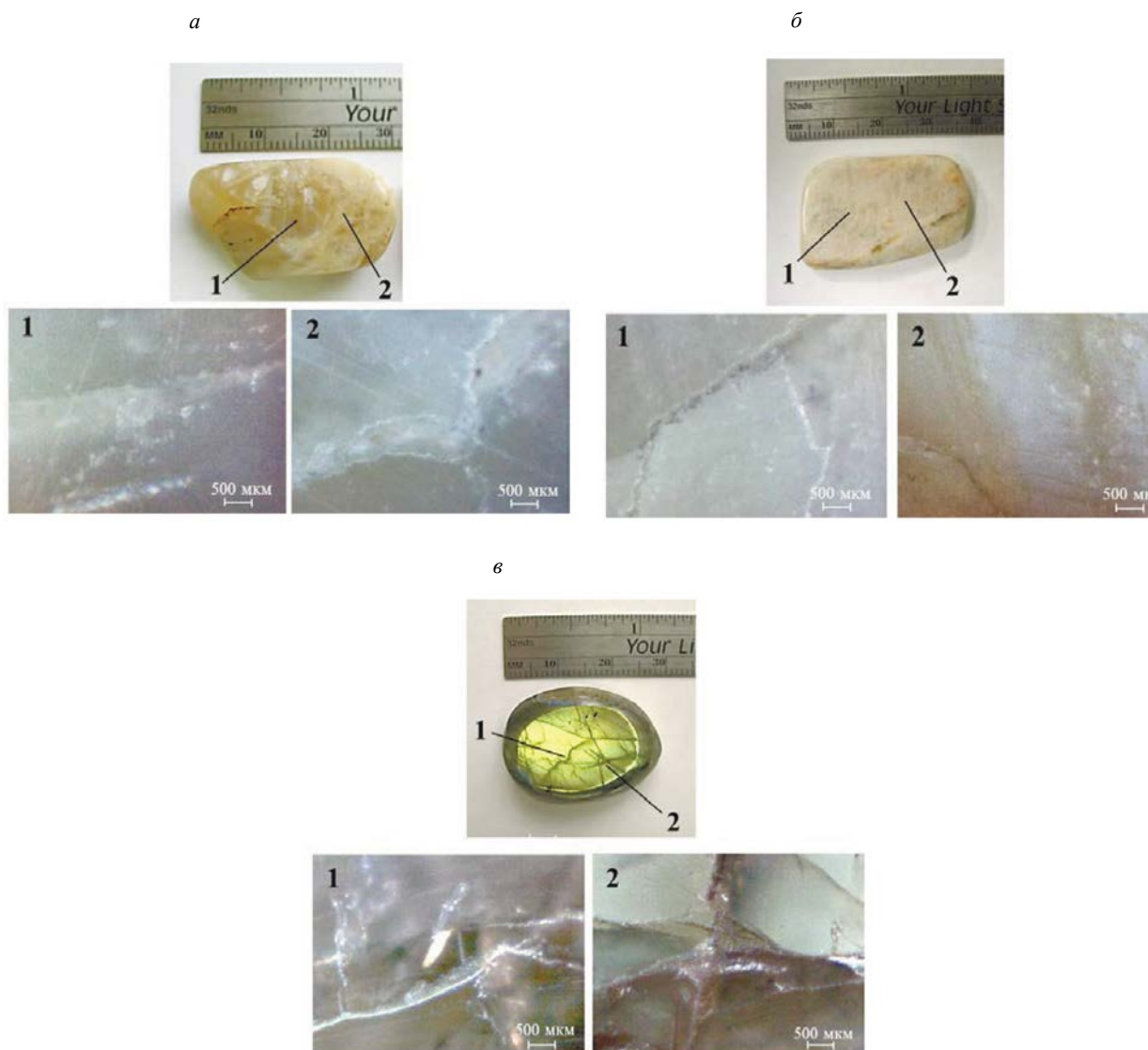


Рис. 1. Фотографии образцов полевых шпатов толщиной H и оптические изображения исследованных зон в каждом образце: ортоклаз № 1, $H = 11,3$ мм (а); ортоклаз № 2, $H = 6,2$ мм (б); плагиоклаз № 3, $H = 8,5$ мм (в).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Для исследования внутренней структуры образцов методом рентгеновской компьютерной томографии использовался трехмерный микротомограф (измерительный сканер) Yamato TDM1000/H-II (Yamato Scientific, Япония), работающий по принципу конусного луча 3-го поколения (метод Фельдкампа). Этот микротомограф ранее успешно применялся для изучения особенностей структуры неоднородных грунтов и строительных материалов различного состава (см., например, [32, 33]). Характерные размеры образцов для исследования структуры ограничены техническими возможностями микротомографа и варьируются от 100 мкм до 5 см. Габариты образцов определяют увеличение съемки и размер изучаемой внутренней зоны. Уменьшение размеров съемки по отношению к общим габаритам образца приводит к возрастанию шума и артефактов в процессе обработки сигнала, в результате чего изображение структуры исследуемой внутренней зоны образца оказывается размытым и менее контрастным. Чем больше характерные размеры образца, тем больше линейный размер вокселя на получаемом рентгеновском изображении и тем хуже пространственное разрешение на этом изображении. Поэтому оптимальный размер образца должен определяться целью исследования, а размер изучаемых неоднородностей его структуры при этом должен более чем в три раза превышать линейный размер вокселя. Ниже в таблице приведены данные о размерах образцов и изучаемых областей, обеспечивающих получение наиболее контрастных изображений с помощью данного микротомографа.

Максимальный линейный размер исследуемых в настоящей работе образцов полевых шпатов варьируется от 20 до 30 мм (см. рис. 1), поэтому размеры исследуемых областей в каждом образце составляют порядка 20 мм. Соответственно, съемка с помощью данного микротомографа позволяет выявить структурные неоднородности с размерами более 130 мкм (данная оценка сделана как трехкратный линейный размер соответствующего вокселя).

Таблица 1

Рекомендуемые размеры образца и изучаемых областей для съемки в рентгеновском микротомографе Yamato TDM1000/H-II при разных увеличениях

Увеличение	Линейный размер образца, мм	Линейный размер исследуемой области, мм	Линейный размер вокселя при разрешении 512 вокселей в каждом направлении, мкм
×4	50	45	87,9
×8	25—30	22,5	43,9
×16	12—15	11,2	22,0
×32	6—10	5,6	11,0
×64	3—5	2,8	5,5
×128	2—3	1,4	2,8

Для реализации ультразвукового неразрушающего контроля локальной микротрещиноватости образцов полевых шпатов используется специальный преобразователь [29], модифицированный для исследования материалов, в которых невозможно непосредственно генерировать ультразвуковые импульсы из-за слабого поглощения лазерного излучения (рис. 2). Источником ультразвука (оптико-акустическим (ОА) источником) служит пленка из черного полиэтилена, приклеенная на фронтальную плоскую поверхность призмы-звукопровода из оргстекла. Ультразвуковые импульсы в полиэтиленовой пленке генерировались при поглощении импульсов Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности [29]. В результате поглощения лазерного импульса в пленке формируются два идентичных импульса продольных ультразвуковых волн, которые распространяются в противоположных направлениях от облучаемой поверхности пленки. Амплитуда и спектр этих импульсов определяются коэффициентом поглощения лазерного излучения в полиэтилене, его теплофизическими свойствами, временной зависимостью интенсивности лазерных импульсов, и отношением акустических импедансов полиэтилена и оргстекла. Один

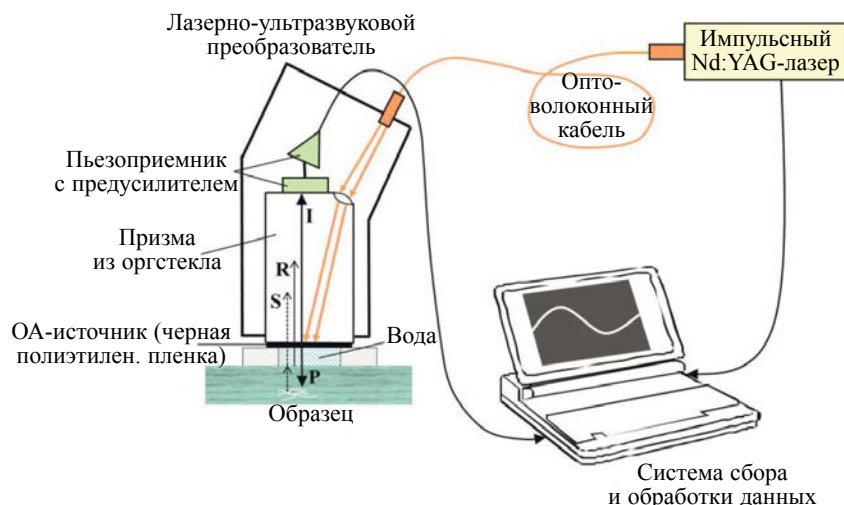


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования локальной трещиноватости образцов минералов.

ультразвуковой импульс **I** (см. рис. 2) распространяется непосредственно в призму по направлению к пьезоприемнику и в дальнейших измерениях не используется, другой импульс **P** (зондирующий импульс) распространяется вперед, проходит через иммерсионный слой дистиллированной воды между пленкой и образцом, и затем попадает в образец. Часть этого импульса отражается на границе вода/образец, распространяется в обратном направлении через воду, полиэтиленовую пленку и призму-звуковод и также регистрируется пьезоприемником (опорный импульс **R**, см. рис. 2). Зондирующий импульс **P**, распространяющийся в образце, претерпевает рассеяние на структурных неоднородностях образца, например, на микротрещинах или зернах. Временной трек ультразвуковых импульсов **S** (см. рис. 2) формируется из сигналов, обратно рассеянных структурными неоднородностями, которые распределены в образце по всей толщине прозвучивания; совокупность таких сигналов является структурным шумом. В данном случае временное окно регистрации структурного шума соответствует пробегу зондирующего импульса **P** по всей толщине образца от облучаемой до противоположной его поверхности и в обратном направлении. Пространственное разрешение в плоскости образцов определяется характерным радиусом ультразвукового пучка на облучаемой поверхности образца (порядка 2—3 мм) и позволяет обнаруживать зоны повышенной локальной микротрещиноватости в структурно-неоднородных геоматериалах. Частота повторения лазерных импульсов равна 1 кГц, ультразвуковой сигнал для последующей обработки получается при 100-кратном усреднении, поэтому время одного измерения составляет порядка 0,1 с.

Для оценки микротрещиноватости в прозвученной зоне образца используется временной трек совокупности импульсов **R** и **S** и такой же трек, зарегистрированный от однородной пластины из плавленого кварца, помещаемой вместо изучаемого образца. Поскольку плавленый кварц акустически однороден, мы полагаем, что структурный шум в нем отсутствует и временная форма ультразвукового импульса для кварца повторяет форму зондирующего импульса **P**, за исключением амплитуды, меняющейся при отражении от границы кварц/вода. В дальнейших расчетах в качестве опорного импульса **R** берется сигнал от кварцевой пластины.

Временные треки нормированных по амплитуде сигналов от кварцевой пластины, ортоклаза № 1 и плагиоклаза № 3 от зон визуально наблюдаемых существенных скоплений микротрещин (зоны 2) представлены на рис. 3а. Сигналы, обратно рассеянные микротрещинами на различных глубинах в образце, регистрируются в форме нерегулярных пиков, следующих за «телом» опорного импульса **R**, и являются структурным шумом. Для контроля степени микротрещиноватости используется спектральный анализ трека ультразвукового сигнала длительности, соответствующей времени прохода зондирующего импульса от облучаемой поверхности образца до тыльной и обратно. На рис. 3б представлены спектры таких треков рассматриваемых сигналов. Предлагаемый метод не требует регистрации временной формы ультразвукового импульса, отраженного от тыльной поверхности образца. Поэтому он может использоваться при исследовании

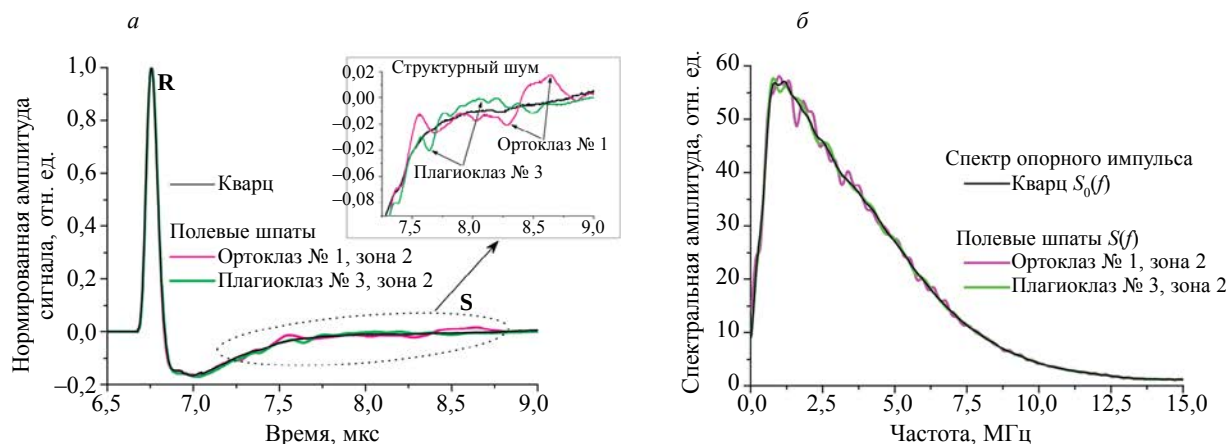


Рис. 3. Примеры ультразвуковых сигналов для кварцевой пластины и для образцов ортоклаза № 1 (зона 2) и плагиноклаза № 3 (зона 2): временные профили (а); соответствующие частотные спектры (б). **R** — опорный импульс от кварцевой пластины, **S** — структурный шум в образцах.

образцов минералов с одной плоской поверхностью, которая соприкасается с иммерсионной жидкостью и через которую зондирующий ультразвуковой импульс вводится в образец. Требование наличия плоской входной поверхности необходимо для корректного измерения мощности структурного шума, поскольку ее шероховатость или кривизна могут исказить форму вводимого зондирующего импульса и, соответственно, повлиять на результаты измерений.

Спектр $S(f)$ временного трека сигнала от исследуемого образца формируется спектрами зондирующего импульса и структурного шума; последний представляется в виде нерегулярных осциллирующих всплесков на фоне гладкого спектра опорного импульса (см. рис. 3б). Спектр зондирующего импульса $S_0(f)$ совпадает со спектром опорного импульса **R** от кварцевой пластины, а спектр структурного шума определяется временной формой сигналов, обратно рассеянных на микротрещинах в прозвученной зоне образца. Мы полагаем, что возрастание амплитуды этих сигналов и соответствующей амплитуды осцилляций в спектре $S(f)$ обусловлено возрастанием микротрещиноватости. Рассмотрим величину:

$$W = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} [S(f) - S_0(f)]^2 df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_0^2(f) df}, \quad (1)$$

которая характеризует мощность структурного шума в рабочем спектральном диапазоне преобразователя от $f_{\min} = 0,2$ МГц до $f_{\max} = 15$ МГц. Вклад в величину W вносят все сигналы, рассеянные на разноразмерных микротрещинах, локализованных в прозвученной зоне образца, без разделения вкладов от микротрещин конкретного размера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета величины W в исследованных зонах образцов минералов в качестве $S_0(f)$ был взят спектр, усредненный по четырем импульсам для произвольно выбранных зон в кварцевой пластине. Разница между полученным $S_0(f)$ и спектром каждого из четырех импульсов представляет собой мощность «аппаратного» шума W_0 , вычисленную по формуле (1), где в качестве $S(f)$ берутся спектры каждого из четырех импульсов. Отличное от нуля значение W_0 связано с электрическими наводками и шумами цифровой дискретизации сигналов, а также зависит от некоторой нестабильности временной формы интенсивности лазерного импульса и соответствующего ультразвукового импульса, генерируемого в полиэтилене для разных зон кварцевой пластины. Усреднение W_0 по четырем реализациям дает величину $\langle W_0 \rangle \approx 1,3 \cdot 10^{-5}$, которая может рассматриваться как погрешность определения мощности структурного шума W для образцов минералов.

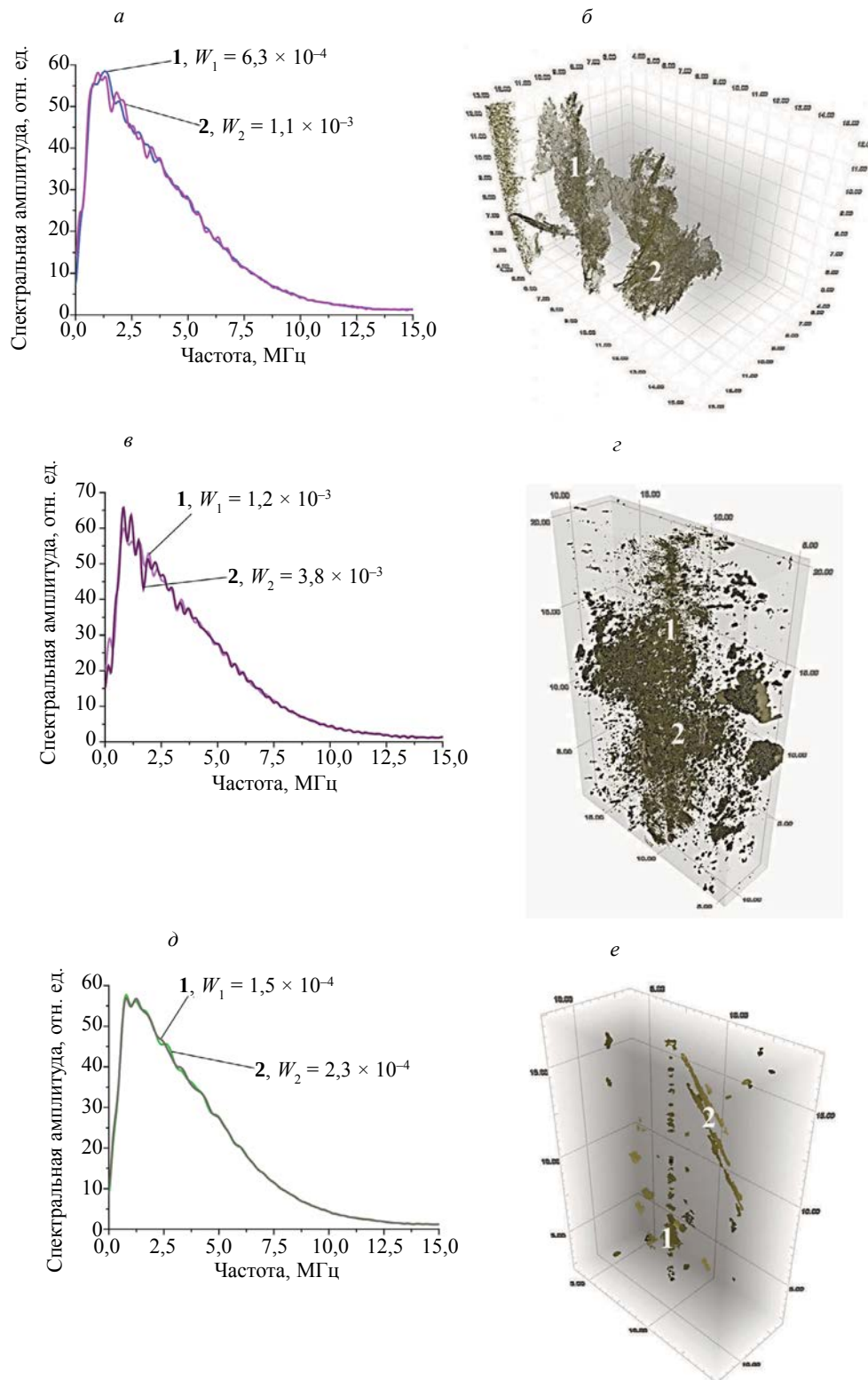


Рис. 4. Спектры $S(f)$ ультразвуковых импульсов и соответствующие значения мощности структурного шума $W_{1,2}$ в исследованных зонах 1 и 2 образцов полевых шпатов (*a, в, д*) и рентгеновские микротомографические изображения этих зон (*б, г, е*): ортоклаз № 1 (*a, б*); ортоклаз № 2 (*в, г*); плагиоклаз № 3 (*д, е*).

На рис. 4 представлены спектры $S(f)$ ультразвуковых импульсов для исследованных зон 1 и 2 всех образцов полевых шпатов с указанием рассчитанных по формуле (1) мощностей структурно-

го шума $W_{1,2}$ и соответствующие рентгеновские микро-томографические изображения этих зон. Видно, что величины $W_{1,2}$ для всех образцов на один-два порядка превышают мощность «аппаратного» шума $\langle W_0 \rangle$. Для рентгеновских изображений выбрано специальное контрастное представление, чтобы исключить фоновое изображение однородной структуры и показать только скопления неоднородностей в исследованных зонах каждого образца. Необходимость такого представления обусловлена тем, что традиционные рентгеновские изображения структуры исследованных образцов имели достаточно низкий контраст из-за их неосесимметричной геометрии образцов, т.е. размеры образцов в поперечной плоскости существенно превышали толщину. Как известно, требование осесимметричной геометрии образцов (цилиндрической или кубической) является необходимым для обеспечения максимальной контрастности получаемых рентгеновских изображений (см., например, [34]). Однако это требование далеко не всегда может быть выполнено для образцов минералов, имеющихся в наличии для проведения исследований. Результаты, представленные на рис. 4, демонстрируют корреляцию между возрастанием мощности структурного шума и плотности («густоты») неоднородностей на рентгеновских изображениях исследуемых зон в каждом образце. Такая корреляция наблюдается не только для каждого образца, но и для разных образцов с разной степенью микротрещиноватости в целом. Например, максимальные значения мощности структурного шума наблюдаются для образца ортоклаза № 2, рентгеновские изображения которого демонстрируют максимальную плотность структурных неоднородностей (рис. 4в, з). Обратная ситуация имеет место для образца плагиоклаза № 3 — минимальные значения мощности структурного шума соответствуют минимальной плотности структурных неоднородностей (рис. 4д, е). Таким образом, возрастание мощности структурного шума, обусловленное увеличением эффективности обратного рассеяния ультразвуковых сигналов, действительно определяется возрастанием локальной концентрации микротрещин в образцах полевых шпатов.

В данной работе впервые проведена верификация лазерного оптико-акустического метода по выявлению очагов скоплений микротрещин в минералах объективно независимым методом рентгеновской компьютерной томографии образцов сложной геометрической формы с использованием специальной высококонтрастной обработки рентгеновских изображений. Поэтому установленная корреляция между возрастающей мощностью структурного шума и увеличением локальной концентрации микротрещин действительно может быть полезной при разработке феноменологических теорий разрушения горных пород при воздействии нагрузок, а также может использоваться для выработки объективных критериев прогнозирования опасных разрушений горных пород и минералов. В данной работе сопоставление результатов ультразвуковых исследований и данных рентгеновской компьютерной томографии выполнено на качественном уровне. Для получения количественной связи мощности структурного шума с уровнем локальной концентрации микротрещин или других структурных неоднородностей в образцах на основе результатов рентгеновской компьютерной томографии необходимо иметь данные о плотности твердой фазы каждого образца, что весьма затруднительно для минералов или горных пород переменного химического состава. Тем не менее такая задача является актуальной и ее решение может являться предметом дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика акустического неразрушающего контроля локальной микротрещиноватости лабораторных образцов минералов с использованием лазерной генерации ультразвука. Измеряется спектральная мощность ультразвуковых импульсов, обратно рассеянных микротрещинами, локализованными в зоне прозвучивания (мощность структурного шума). Регистрация этих импульсов осуществляется при наличии только одной плоской поверхности образцов без необходимости определения их толщины и детектирования донного эхо-сигнала. Пространственное разрешение в плоскости образцов соответствует характерному радиусу ультразвукового пучка на поверхности образца (порядка 2-3 мм), что позволяет обнаруживать зоны повышенной трещиноватости в структурно-неоднородных геоматериалах. Впервые проведена верификация предлагаемого лазерного оптико-акустического метода с использованием независимого метода рентгеновской компьютерной томографии. Получено подтверждение того, что увеличение мощности структурного шума действительно обусловлено возрастанием локальной микротрещиноватости в объеме образцов. Таким образом, установленная связь между локальной микротрещиноватостью и мощностью структурного шума может применяться в системах объективного анализа трещинообразования в минералах и горных породах при воздействии различных нагрузок.

Исследования образцов минералов методом рентгеновской компьютерной томографии проведены на микротомографе Yamato TDM1000/Н-II, приобретенном в рамках реализации Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sagong M., Bobet A.* Coalescence of multiple flaws in a rock model material in uniaxial compression // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2002. V. 39. P. 229—241.
2. *Wong L.N.Y., Einstein H.H.* Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2009. V. 46. P. 239—249.
3. *Кривошеев И.А., Шамурина А.И.* Чувствительный метод контроля изменения трещиноватости в массиве горных пород // *Дефектоскопия*. 2013. № 9. С. 62—67.
4. *Yin P., Wong R.H., Chau K.T.* Coalescence of two parallel pre-existing surface cracks in granite // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2014. V. 68. P. 66—84.
5. *Кривошеев И.А., Шамурина А.И.* Контроль образовавшихся несплошностей в образце твердого тела акустическим методом // *Дефектоскопия*. 2017. № 9. С. 29—34.
6. *Лавров А.В., Шкуратник В.Л.* Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 6—18.
7. *Кривошеев И.А.* Метод связанных диполей для локации источников акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. 2007. № 6. С. 37—44.
8. *Grosse C.U., Ohtsu M. (eds.)* Acoustic emission testing: Basics for research — applications in civil engineering. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 406 p.
9. *Builo S.I., Builo B.I., Chebakov M.I.* Probabilistic-Information Approach to Assessing the Reliability of the Results of the Acoustic-Emission Method of Testing and Diagnostics // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2021. V. 57. No. 5. P. 375—382. [*Буйло С.И., Буйло Б.И., Чебаков М.И.* Вероятностно-информационный подход к оценке достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики // *Дефектоскопия*. 2021. № 5. С. 37—44.]
10. *Aki K., Richards P.G.* Quantitative seismology (2nd ed.). CA: Univ. Sci. Books, 2009. 742 p.
11. *Meglis I.L., Chow T., Martin C.D., Young R.P.* Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2005. V. 42. No. 1. P. 25—34.
12. *Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Игнатович В.К.* Особенности распространения продольных и поперечных упругих волн в текстурированных горных породах // *Физика Земли*. 2009. № 5. С. 57—69.
13. *Nicco M., Holley E.A., Hartlieb P., Kaunda R., Nelson P.P.* Methods for characterizing cracks induced in rock // *Rock Mech. Rock Eng.* 2018. V. 51. No. 7. P. 2075—2093.
14. *Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Ченур М.Д.* Закономерности изменения скоростей упругих волн в горных породах различной пористости при механическом и термическом нагружении по данным лабораторных экспериментов // *ФТПРПИ*. 2020. № 5. С. 21—32.
15. *Abbakumov K.E., Vagin A.V., Sidorenko I.G.* Acoustic Characteristics of Solid Elastic Media with Oriented Microcracking // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2023. V. 59. No. 4. P. 393—403. [*Аббакумов К.Е., Вагин А.В., Сидоренко И.Г.* Акустические характеристики твердых упругих сред с ориентированной микротрещиноватостью // *Дефектоскопия*. 2023. № 4. С. 3—13.]
16. *Kim K.-B., Hsu D.K., Barnard D.J.* Estimation of porosity content of composite materials by applying discrete wavelet transform to ultrasonic backscattered signal // *NDT & E Int.* 2013. V. 56. P. 10—16.
17. *Karabutov A.A., Podymova N.B.* Nondestructive porosity assessment of CFRP composites with spectral analysis of backscattered laser-induced ultrasonic pulses // *J. Nondestruct. Eval.* 2013. V. 32. P. 315—324.
18. *Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Шалимова Е.В.* Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 186 с.
19. *Романишин Р.И., Романишин И.М.* Оценка рассеянной поврежденности конструкционных материалов // *Дефектоскопия*. 2019. № 2. С. 25—35.
20. *Khlybov A.A., Uglov A.L.* On the Use of Structural Noise Parameters in Testing 20GL Steel with Rayleigh Surface Waves under Elastoplastic Deformation // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2021. V. 57. No. 7. P. 517—524. [*Хлыбов А.А., Углов А.Л.* Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэлея стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования // *Дефектоскопия*. 2021. № 7. С. 3—10.]
21. *Khlybov A.A., Uglov A.L., Demchenko A.A.* On Spectral-Acoustic Method for Estimating Porosity of Metals Produced by Hot Isostatic Pressing // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2022. V. 58. No. 12. P. 1051—1063. [*Хлыбов А.А., Углов А.Л., Демченко А.А.* О спектрально-акустическом способе оценки пористости металлов, полученных методом горячего изостатического прессования // *Дефектоскопия*. 2022. № 12. С. 3—16.]
22. *Vary A.* Material property characterization / In: Moore P.O. (ed.) *Nondestructive testing handbook. Ultrasonic testing*. Columbus: ASTM, 2007. P. 365—431.
23. *Fitting D.W., Adler L.* Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation. New York: Plenum Press, 1981. 354 p.

24. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
25. Карабутов А.А., Подымова Н.Б. Неразрушающий контроль усталостных изменений структуры композитов лазерным ультразвуковым методом // Механика композитных материалов. 1995. Т. 31. № 3. С. 405—410.
26. Белов М.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л., Карабутов А.А., Макаров В.А., Подымова Н.Б. Количественная оценка размеров минеральных зерен методом лазерной ультразвуковой спектроскопии // ФТПРПИ. 2003. № 5. С. 3—8.
27. Исмаилов И.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И., Мигачев С.А., Хасанов А.А. Обнаружение поверхностных и объемных дефектов в металлах лазерно-акустическим способом // Дефектоскопия. 2014. № 6. С. 16—24.
28. Karabutov A.A., Podymova N.B. Nondestructive porosity assessment of CFRP composites with spectral analysis of backscattered laser-induced ultrasonic pulses // J. Nondestruct. Eval. 2013. V. 32. P. 315—324.
29. Подымова Н.Б., Калашиников И.Е., Кобелева Л.И. Лазерный оптико-акустический метод количественной оценки пористости литых дисперсно-упрочненных металломатричных композиционных материалов // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 3—13.
30. Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Влияние трещиноватости полевых шпатов на спектральную мощность обратнорассеянных широкополосных импульсов продольных ультразвуковых волн // Акустический журнал. 2022. Т. 68. № 6. С. 679—688.
31. Brown J.M., Angel R.J., Ross N.L. Elasticity of plagioclase feldspars // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. V. 121. P. 663—675.
32. Усов А.Н., Чернов М.С., Соколов В.Н., Вознесенский Е.А. Изменение микростроения глинистых грунтов при деформировании в условиях трехосного сжатия с учетом проявления деформационной неустойчивости // Вестник Моск. университета. Сер. 4: Геология. 2017. № 6. С. 87—91.
33. Morozov I., Zakusin S., Kozlov P., Zakusina O., Roshchin M., Chernov M., Boldyrev K., Zaitseva T., Tyupina E., Krupskaya V. Bentonite-concrete interactions in engineered barrier systems during the isolation of radioactive waste based on the results of short-term laboratory experiments // Appl. Sci. 2022. V. 12. No. 6. Art. 3074.
34. Buzug T.M. Computed tomography. From photon statistics to modern cone-beam CT. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 522 p.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РЕАЛКАЛИНИЗАЦИЯ КАРБОНИЗИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ВЛИЯНИЮ ВРЕМЕНИ И ПЛОТНОСТИ ТОКА

© 2023 г. Ана Каролина Рашадель¹, Веллингтон Мазер^{1,*}

¹Федеральный технологический университет штата Парана, Куритиба, Парана, Бразилия
E-mail: *wmazer@utfpr.edu.br

Поступила в редакцию 07.07.2023; после доработки 10.08.2023

Принята к публикации 22.08.2023

Депассивация армирующих элементов, вызванная снижением щелочности бетона в результате процесса карбонизации, может привести к возникновению коррозии стали. Восстановление щелочности может быть осуществлено методами химической реалкализации (ХР) или электрохимической реалкализации (ЭХР). В связи с этим целью настоящей работы является оценка влияния времени воздействия и плотности тока, используемых в процессе электрохимической реалкализации. Для проведения исследований образцы раствора были сформованы с армирующим стержнем для электрического соединения и выдержаны в течение 24 мес. в камере для карбонизации. По истечении этого срока проверялась глубина карбонизации, затем образцы подвергались процессу электрохимической реалкализации с использованием 3 различных значений тока — 0,5, 1,0 и 1,5 А/м² и выдерживались в течение различных периодов времени (7, 14 и 21 сут.) в процессе восстановления. Дополнительные испытания на абсорбцию, прочность на сжатие, измерение глубины карбонизации, ртутная интрузионная порозиметрия (РИП) и термогравиметрический анализ (ТГА) также проводились на контрольных, карбонизированных и повторно гальванизированных образцах. По результатам испытаний было замечено, что процесс восстановления начинается через 7 дней при использовании наименьшей плотности тока. Также было отмечено лучшее соотношение плотности тока и времени применения, если учесть результаты ртутной интрузионной порозиметрии и термогравиметрического анализа в сочетании с процессом повторной реалкализации.

Ключевые слова: электрохимическая реалкализация, карбонизация, коррозия, ремонт, строительный раствор.

ELECTROCHEMICAL REALKALISATION OF CARBONATED CEMENTITIOUS MATRIX: CHARACTERIZATION RESEARCH TO INFLUENCE OF TIME AND CURRENT DENSITY

Ana Carolina Rachadel¹, Wellington Mazer^{1,*}

¹Univeridade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil
E-mail: *wmazer@utfpr.edu.br

The depassivation of reinforcement caused by the reduction of concrete alkalinity due to the concrete carbonation process can induce the appearance of steel corrosion. The restoration of alkalinity can be done by chemical realkalinization (CRA) or electrochemical realkalinization (ERA) methods. In this context, the present work aims to evaluate the influence of the application time and the current density used in the electrochemical realkalinization process. For the development of the research, mortar samples were molded with a reinforced bar for electrical connection and remained for 24 months in a carbonation chamber. After this period, the carbonation depth that occurred was verified and then the specimens were submitted to the electrochemical realkalinization process using 3 different current values, 0.5, 1.0 and 1.5 A/m² and remained at different periods (7, 14 and 21 days) in the recovery process. Additional tests of absorption, compressive strength, carbonation depth measurements, mercury intrusion porosimetry (MIP) and thermogravimetric analysis (TGA) were also carried out on reference, carbonated and realkalinized specimens. Based on the results of the tests, it was observed that the recovery process starts after 7 days with the lowest current density used. A better current density x application time ratio was also observed considering the results of the mercury intrusion porosimetry and thermogravimetric analysis tests in conjunction with the realkalinization process.

Keywords: Electrochemical Realkalisation. Carbonation. Corrosion. Repair. Mortar.

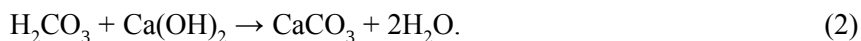
DOI: 10.31857/S0130308223100032, **EDN:** WZORIP

1. ВВЕДЕНИЕ

В железобетонных конструкциях арматура естественным образом защищена от коррозии высокой щелочностью цементного раствора, сохраняющего пассивирующий слой стали [1].

Низкое качество бетона в сочетании с небольшим слоем покрытия арматуры может породить возникновение очагов коррозии арматуры в результате процесса карбонизации [2]. Карбонизация структуры с последующей коррозией арматуры происходит в основном в районах с высокой концентрацией углекислого газа в окружающей среде, например, в городских условиях [3].

Процесс карбонизации происходит, когда диоксид углерода (CO_2), имеющийся в атмосфере, в процессе диффузии проникает в бетон и растворяется в той воде, которая содержится в порах затвердевшего бетона, с образованием угольной кислоты (H_2CO_3). В основном, кислота реагирует с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), который имеется в цементном тесте, согласно уравнениям (1) и (2), в результате чего образуется карбонат кальция (CaCO_3) и вода (H_2O):



Нейтрализация щелочей угольной кислотой расходует щелочные продукты теста и вызывает снижение pH до значений, ниже тех, которые необходимы для поддержания пассивации стали [4—6].

Вышеуказанные химические реакции протекают с большей скоростью при влажности воздуха в диапазоне от 50 до 70 % относительной влажности. Когда бетон находится в насыщенном состоянии, проникновение CO_2 происходит очень медленно и в небольших количествах, что затрудняет его реакцию с $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Когда бетон сухой, проникновение CO_2 хотя и происходит, но воды недостаточно для превращения угольного газа в угольную кислоту [5].

Когда фронт карбонизации достигает арматуры и разрушает пассивный слой, вероятность возникновения коррозии возрастает из-за наличия в среде воды и газообразного кислорода (O_2). Скорость продвижения фронта карбонизации в изделии зависит от характеристик бетона и изделия, таких как: толщина покрытия, уплотнение, соотношение вода/цемент, расход цемента и условия затвердевания [6].

Обзор методов измерения и контроля коррозии был представлен Daniyal и Akhtar [7], которые отметили использование электрохимических методов в качестве неразрушающих. Rocha и др. [8] отметили, что применение минеральных добавок уменьшает глубину карбонизации в растворах самоуплотняющегося бетона. Silva и др. [9] использовали образцы раствора для оценки влияния метода уплотнения на продвижение фронта карбонизации, при этом были отмечены значительные различия между вибрацией и уплотнением.

Исследование способности плотины Итайпу (Бразилия) поглощать CO_2 , проведенное Possan и др. [10], подтверждает влияние воздействия влаги на возможность и скорость карбонизации конструкций. Образцы, извлеченные на уровне погруженного фундамента плотины (насыщенное состояние), показали глубину карбонизации, близкую к нулю, в то время как на вершине плотины, подверженной климатическим колебаниям, показатели достигали 30 мм.

Vu и др. [11] исследовали в течение 5 лет образцы бетона в 5 разных странах в условиях окружающей среды в местах, подверженных воздействию дождя и защищенных от него. Результаты не показали существенной разницы между поведением образцов в разных местах, однако можно было заметить, что количество дождливых дней оказывает большее влияние на глубину карбонизации, чем общее количество осадков в регионе. В краткосрочной перспективе выяснено, чем больше количество дождливых дней, тем ниже скорость карбонизации.

По данным González и др. [12], наиболее распространенным методом восстановления поврежденных карбонизацией элементов является замена поврежденного участка новым бетоном. Этот процесс является дорогостоящим и опасным, к тому же приводит к образованию строительных отходов.

Такие методы, как химическая реалкализация (ХР) и электрохимическая реалкализация (ЭХР), предлагаются в качестве альтернативы традиционному методу ремонта, поскольку они менее опасны для окружающей среды, здоровья и безопасности рабочих [13].

Метод ЭХР основан на пропускании электрического тока через бетон к арматуре с помощью внешней металлической сетки, выполняющей роль анода системы, покрывающей поверхность железобетонного изделия. Источник постоянного тока подключается к аноду и арматуре, которая становится катодом системы. В качестве электролита используется щелочной раствор, покрывающий как сетку, так и изделие [5, 13, 14].

Согласно Banfil [5], используемый электрический ток должен составлять примерно 1 А/м². Mietz [6] рекомендует применять метод в течение 3—14 дней при плотности тока от 0,8 до 2 А/м². С другой стороны, Бертолини и др. [14] отмечают, что результирующая глубина реалкализации зависит от характеристик бетона, таких как тип цемента и соотношение вода/цемент (в/ц). В одном из экспериментов сравнивалась эффективность метода ЭХР путем поддержания тока 1,0 А/м² в течение 3 недель на образцах, изготовленных с соотношением вода/цемент 0,70 и 0,55. Было замечено, что там, где бетон имел большую пористость, внутренний и внешний фронты реалкализации

ции совпадали, в то время как в образцах с в/ц 0,55 между фронтами оставалась карбонизированная полоса.

Для одинаковых значений плотности тока Yeih и Chang [1] наблюдали лучшее восстановление pH бетона с увеличением продолжительности применения метода ЭХР. Авторы также отметили, что при одинаковой продолжительности применения метода эффективность восстановления щелочности деталей возрастает по мере увеличения плотности тока.

Используя ток 1,0 А/м² и щелочные растворы карбоната натрия (Na₂CO₃) и карбоната калия (K₂CO₃) с концентрацией 1 М, Гонсалес и др. [3] пришли к выводу, что восстановление pH карбонизированного бетона происходит в основном в первые 5 дней, а для полной реалкализации образцов необходим период в 13 дней.

Bertolini и др. [15] восстанавливали железобетонные колонны колокольни церкви, построенной в 1920-х годах, используя электрохимическую реалкализацию. Авторы отметили, что из-за низкой пористости конструкции вклад электролита в реалкализацию был ниже по сравнению с реакциями, протекающими вокруг арматуры. Таким образом, авторы пришли к выводу, что защита арматуры после проведения обработки в основном обусловлена образованием щелочных ионов вокруг стальных стержней, защищающих их от коррозии.

Reou и Ann [16] исследовали влияние электрохимической обработки на микроструктуру границы раздела сталь—бетон. Они пришли к выводу, что обработка увеличила количество гидроксида кальция, присутствующего в тесте, на 12 %, а также показала, что это соединение не образует сплошного слоя в области сопряжения с арматурой. Также было замечено, что пористость вокруг стали увеличивается при применении электрохимического метода и связана с величиной приложенного электрического тока.

Чтобы устранить существующий пробел в исследованиях по восстановлению карбонизированного бетона, Ribeiro и др. [17] изучили влияние типа цемента, соотношения вода/цемент и арматурного покрытия на метод электрохимической реалкализации и его эффективность в перепасивании арматуры. Авторы использовали ток 2 А/м², титановую сетку и 1М раствор карбоната натрия (NaCO₃). Как и в исследованиях Banfill [5] и Bertolini и др. [15], было отмечено, что электролиз вокруг арматуры является наиболее важным процессом в восстановлении щелочного pH рядом с арматурой. Было показано, что тип цемента влияет на запас щелочных продуктов в тесте, и чем меньше этот запас, тем больше времени и тока требуется для завершения обработки. Результаты, представленные в исследовании, подтверждают, что соотношение вода/цемент обратно пропорционально удельному сопротивлению бетона.

Zou и др. [18] использовали составы, содержащие летучую золу и доменный шлак, для изучения влияния минеральных добавок на продвижение фронта реалкализации и карбонизационную стойкость бетона. Авторы отметили, что использование минеральных добавок способствует более интенсивному продвижению фронта карбонизации, а также фронта реалкализации, что согласуется с результатами исследований, представленных Khan и Lyns-dale [19] и Kurda и др. [20].

В исследовании, проведенном Aguirre-Guerrero и Gutiérrez [21], получены результаты, противоречащие данным Zou и др. [18]. В последнем исследовании было отмечено значительное повышение эффективности метода электрохимической реалкализации при увеличении времени его применения с 3 до 21 дня. Этого не наблюдается для бетонов с добавлением метакрилатной летучей золы, которые показывают более низкую эффективность метода по сравнению с эталонным бетоном через 15 суток применения реалкализации.

Tissier и др. [22] использовали метод ЭХР для обработки исторических зданий, подвергшихся воздействию хлоридов и карбонизации, и сравнили одновременное воздействие с действием только одного из внешних агентов. Используемый электрохимический метод позволил достичь степени извлечения хлоридов 90 % и повысить pH до значений около 10, что показало важность повышения pH в отношении скорости коррозии арматуры.

С другой стороны, Zhu и др. [23], изучая влияние электрохимической реалкализации на образцы в течение 4, 10, 13 месяцев и 7 лет, отметили, что через 7 лет все стержни были депассивированы, что указывает на необходимость проведения исследований по снижению проницаемости бетона после выполнения этой методики.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящего исследования является анализ зависимости плотности тока от времени воздействия на эффективность процесса электрохимической реалкализации цементных матриц. Для этого использовались образцы цементного раствора, внутри которых находился стальной стержень для подключения к электрической цепи. Образцы подвергались электрохимической реалкализации с использованием 3 токов и 3 периодов времени. Результаты показали эффективность метода и различия между плотностью тока и временем воздействия.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Материалы

а) Цемент

Для проведения исследований использовали портландцемент CPV-ARI-RS, так как он имеет наименьшее количество добавок среди бразильских цемента. Его химические, физические и механические характеристики приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химические характеристики CPV-ARI

Показатели	Химический анализ			
	Состав, %			
	LF	MgO	SO ₃	IR
Предельные значения NBR 16697	≤ 6,5	*	≤ 4,5	*
Среднее	4,6	5,8	3,3	11,5
СКО	0,5	0,1	0,2	1,4
Минимум	3,7	5,4	2,8	9
Максимум	5,6	5,9	3,7	14,2

Источник: производитель

* — не определялось

Таблица 2

Физические и механические характеристики

Показатели	Физические и механические										
	Тонкость помола, %		Уд. поверхность по Блейну	Вода, %	Время схватывания		Тепловое расширение, %	Прочность на сжатие, МПа			
	#200	#325	см²/г		Начало, мин	Конец, мин		1 день	3 дня	7 дня	28 дней
Предельные значения 16697	≤ 6,0	*	≥ 3000	*	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	≥ 11,0	≥ 24,0	≥ 34,0	*
Среднее	0,1	1,1	5028	30,2	231	295	0,4	21,6	31,7	37,7	48,3
СКО	0,1	0,6	145	0,4	17	20	0,4	1,1	1,3	1,1	1,2
Минимум	0	0,6	4760	29,4	205	265	0	20,2	30,1	36	47,1
Максимум	0,3	2,4	5260	31	255	325	0,1	23,8	34,8	39,8	51,6

Источник: производитель

* — не определялось

б) Армирование

Для изготовления образцов применяли прутки из стали СА-60 диаметром 4,2 мм. Прутки были нарезаны на куски длиной 13 см таким образом, чтобы при помещении внутрь образца часть их была свободна и позволяла соединить их с электрическими кабелями.

в) Мелкий заполнитель

В качестве мелкого заполнителя использовали искусственный песок осадочного происхождения розоватого цвета, с модулем крупности 2,45 и максимальным характерным размером 4,8 мм, относящийся к оптимальной зоне NBR 7211 [24]. На рис. 1 приведена гранулометрическая кривая используемого песка.

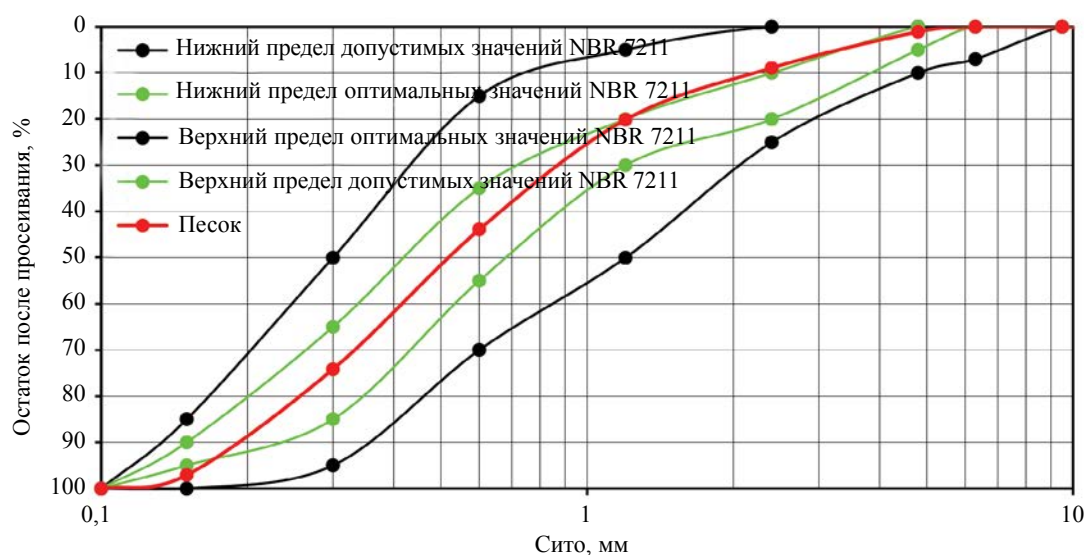


Рис. 1. Распределение размера частиц.

г) Металлическая сетка и щелочной раствор

На основании исследований, проведенных Aguirre-Guerrero, Gutiérrez [21] и Lachovicz [25], было принято решение использовать для сборки системы электрохимической реалкализации сетку из нержавеющей стали. Металлическая сетка была разрезана на прямоугольные куски с примерными размерами $0,17 \times 0,1$ м, чтобы полностью обхватить боковые стороны испытуемых образцов армированных растворов.

Щелочной раствор готовился из порошкообразного карбоната кальция (Na_2CO_3) и воды в концентрации 5,0 мас. %. Учитывая, что молярная масса карбоната натрия составляет 106 г/моль, был получен раствор концентрацией 0,5 М.

д) Электрическая схема

Для сборки ячейки электрохимической реалкализации использовали одноканальный источник постоянного тока марки Minipa, модель DC-MPS 3005, с максимальной силой тока 5 А.

2.2. Методы

а) Получение образцов

Все образцы имели цилиндрическую форму диаметром 5 см и высотой 10 см. Для каждого эксперимента было изготовлено по 6 образцов, чтобы уровень статистической значимости составлял 5 %. Была принята следующая номенклатура: 1) эталонные образцы — соответствуют образцам, которые находились во влажной камере до проведения испытаний и были изготовлены из обычного раствора, состав которого приведен ниже; 2) карбонизированные образцы — образцы раствора, находившиеся в течение 24 месяцев в камере для карбонизации; 3) образцы для реалкализации, находившиеся в камере для карбонизации в течение 24 месяцев и имевшие стальной стержень для осуществления электрического соединения.

Для каждого сочетания силы тока и времени образцы были отнесены к категориям «А», «В» и «С», причем «А» подвергался воздействию $0,5 \text{ A/m}^2$, «В» — 1 A/m^2 , а «С» — $1,5 \text{ A/m}^2$. Остальные обозначения (7D, 14D и 21D) относятся к времени протекания процесса реалкализации.

Табл. 3 показывает количественные характеристики образцов для каждого проводимого эксперимента.

Карбонизированные образцы были также подвергнуты испытаниям методом ртутной интрузионной порозиметрии (РИП) и термогравиметрического анализа (ТГА). Для каждого эксперимента отбирался образец, расположенный близко к поверхности, и образец, расположенный близко к арматуре. Степень реалкализации также проверялась путем определения pH реалкалинизированных образцов с помощью потенциометрии с ионоселективными электродами.

Таблица 3

Количественные характеристики образцов

Смеси	Эксперименты					
	Плотность тока, А/м²	Время, дни	Прочность на сжатие		Абсорбция	Реалкализация
			28 дней	Карбонизированные		
Эталонные			6	6	6	—
Карбонизированные				6	6	—
A 7D	0.5	7	—	—	—	6
A 14D	0.5	14	—	—	—	6
A 21D	0.5	21	—	—	—	6
B 7D	1	7	—	—	—	6
B 14D	1	14	—	—	—	6
C 7D	1.5	7	—	—	—	6
C 14D	1.5	14	—	—	—	6
					Всего	72

б) Смесь

Для облегчения проникновения углекислого газа (CO₂) был изготовлен раствор с высокой пористостью, в котором использовалась смесь с высоким содержанием песка и соотношением вода/цемент. Расход цемента составил 314 кг/м³ раствора при соотношении вода/цемент 0,65 и смеси 1 : 6 : 0,65.

в) Формование и затверждение

Были отформованы цилиндрические образцы раствора диаметром 5 см и высотой 10 см, чтобы добиться примерно минимального номинального покрытия арматуры 2,5 см в железобетонных плитах для класса агрессивности II, для городской среды, описанного в NBR 6118 [26].

Формование образцов производилось в соответствии с NBR 7215 [27]. После уплотнения последнего слоя в центр каждого образца был вставлен стальной стержень диаметром 4,2 мм и длиной около 13 см для реалкализации с целью будущего подключения электрической цепи.

г) Карбонизация

Образцы были разложены на пустых полках, чтобы каждый мог контактировать с атмосферой, насыщенной CO₂, и находились в карбонизационной камере с июня 2018 г. по июнь 2020 г. в общей сложности 24 мес. Три раза в неделю камера регулировалась для поддержания концентрации углекислого газа внутри нее. В табл. 4 приведены средние значения влажности, температуры и концентрации CO₂, поддерживаемые в карбонизационной камере.

Таблица 4

Условия, поддерживаемые в карбонизационной камере

Влажность, %	Температура, °C	Содержание CO ₂ , %
78	23	8,29

д) Электрохимическая реалкализация

Для снижения удельного сопротивления раствора и облегчения проведения тока по цепи образцы предварительно пропитывались водой. После завершения образец разрезался циркулярной пилой в поперечном направлении на расстоянии 1 см от основания. Этот разрез выполнялся для проверки стадии карбонизации образцов после их хранения в карбонизационной камере в течение 24 месяцев.

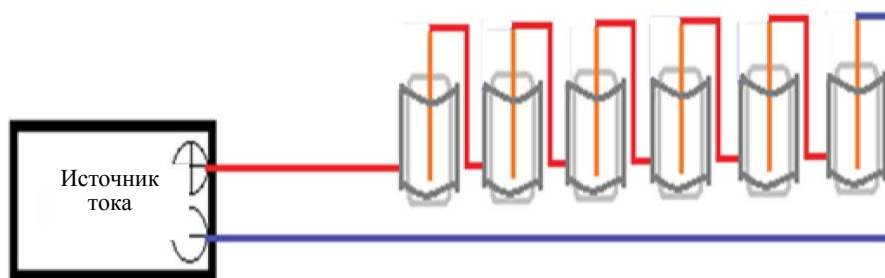


Рис. 2. Схема системы реалкализации.

Образцы были пронумерованы от СР 1 до СР 6 и соединены последовательно таким образом, что металлическая сетка СР 1 была подключена к положительному полюсу выпрямителя тока, а стальной пруток СР 6 — к отрицательному полюсу выпрямителя тока.

Сборка схемы электрохимической реалкализации осуществлялась в соответствии с рис. 2.

Последовательное подключение схемы обусловлено тем, что в этом случае через все образцы будет проходить одинаковый ток. В этом случае возможны различия в значениях напряжения, приложенного к каждому образцу, если их удельное сопротивление различно.

Для каждой комбинации плотности тока (0,5, 1 и 1,5 А/м²) и времени (7, 14 и 21 день) к выпрямителю тока последовательно подключались шесть образцов. Регулировка тока проводилась ежедневно в соответствии с табл. 5, приведенной ниже, и как показано на рис. 3.

Таблица 5

Плотность тока

Площадь, м ²		Плотность тока, А/м ²		
1 образец	6 образцов	0,5 А/м ²	1 А/м ²	1,5 А/м ²
0,02	0,09	0,05	0,09	0,14

Рис. 3. Система для реалкализации: смесь А — 0,5 А/м².

Для проверки влияния карбонизации и электрохимической реалкализации были проведены дополнительные испытания: абсорбция, прочность на сжатие, измерение глубины карбонизации, ртутная интрузионная порозиметрия (РИП) и термогравитометрический анализ (ТГА).

Учитывая, что процесс электрохимической реалкализации проводился при различных плотностях тока и разном времени воздействия, для каждого процесса были проведены измерения глубины карбонизации, МИП и ТГА для определения влияния этих параметров, а также определение pH методом потенциометрии с использованием ионоселективных электродов.

2.3. Испытания

а) Абсорбция

Испытания образцов раствора на абсорбцию проводились в соответствии с требованиями стандарта NBR 9778 [28]. Для проведения испытаний использовали по шесть образцов каждой группы — контрольных и карбонизированных. Поскольку поведение карбонизированного бетона по этому свойству уже хорошо известно, данное испытание было проведено для определения характеристик материала.

б) Прочность на сжатие

Испытание проводилось в соответствии с NBR 5739 [29] на оборудовании EMIC DL-30. Испытывались контрольные образцы, которые находились в камере влажности в течение 28 суток, и образцы, подвергнутые карбонизации в камере карбонизации в течение 24 месяцев. Поскольку поведение карбонизированного бетона по этому свойству уже хорошо известно, данное испытание было проведено для определения характеристик материала.

в) Глубина карбонизации

Для определения глубины карбонизации образцы, подлежащие реалкализации, разрезали в поперечном направлении, примерно на 1 см выше основания, чтобы получить срез образца.

После разрезания образцы опрыскивались 1 %-м раствором фенолфталеина для определения глубины карбонизации после пребывания в карбонизационной камере, как показано на рис. 4.



Рис. 4. Образцы, покрытые раствором фенолфталеина.

По окончании процесса электрохимической реалкализации образцы были расколоты в продольном направлении для проверки степени реалкализации.

Для проверки эффективности метода электрохимической реалкализации на исследуемые образцы вновь наносился раствор фенолфталеина.

з) *Ртутная интрузионная порозиметрия (МИП)*

Испытание методом ртутной интрузионной порозиметрии проводилось с использованием оборудования Quantachrome, модель PoreMaster 33. Диапазон давлений в оборудовании может изменяться от 0,2 до 33 000 psi, а диапазон размеров пор — от 1100 до 0,0064 мкм. Анализ пористости заключается в получении распределения диаметров пор по данным «давление—объем» при проникновении ртути в пористый материал.

д) *Термогравиметрический анализ (ТГА)*

Для проведения термогравиметрических испытаний использовалось оборудование модели RB-3000-20 фирмы BR Engenharia, без функции отвода азота, изменяющее температуру от 25 до 1000 °C со скоростью 10 °C/мин. Оборудование состоит из электронных весов с чувствительностью 0,01 г. Система нагрева осуществляется металлическим электродом сопротивления, соединенным с огнеупорным бетоном, с изоляцией из керамического волокна, который может достигать температуры до 1200 °C. Для образцов с тремя токами и различным временем нагрева проводился термогравиметрический анализ (ТГА), который иллюстрирует изменение массы в зависимости от температуры и времени, и дифференциальный сканирующий калориметрический анализ (СКА).

е) *Потенциометрия с ионоселективными электродами*

В качестве оборудования использовался флуориметр BenchTop, pH 0-14, модель K-39-1014B, со стеклянным электродом модель K38-1465. Образцы собирались из 2 г фрагментов ступки, прошедших через сито 0,15 мм, разбавленных в 10 мл дистиллированной воды. После разбавления измеряли pH раствора.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Абсорбция

Результаты испытания на абсорбцию для эталонных образцов, находившихся в течение 28 дней в камере влажности, и карбонизированных образцов, находившихся в течение 24 месяцев в камере карбонизации, представлены в табл. 6, в среднем по 6 образцам.

Таблица 6

Результаты испытаний на абсорбцию

	Эталонные, %	Карбонизированные, %
Среднее	5,70	3,39
Стандартное отклонение	0,012	0,009
Коэффициент вариации, %	21,75	26,31

Результаты испытаний показывают, что некарбонизированные контрольные образцы обладают большей абсорбцией, чем карбонизированные, согласно дисперсионному анализу, проведенному с доверительной вероятностью 95 %. Этот результат подтверждает теорию о том, что процесс карбонизации снижает пористость бетона за счет осаждения частиц карбоната кальция, закрывающих его поры; этот эффект также наблюдается в [30—32].

3.2. Прочность на сжатие

Контрольные образцы были испытаны через 28 дней для определения прочности на сжатие смеси, использованной для экспериментов. Через 24 месяца были испытаны еще 4 контрольных образца, которые показали аналогичные результаты по прочности на сжатие, причем статистические различия не были подтверждены тестом ANOVA. Карбонизированные образцы были испытаны через 24 месяца в камере карбонизации.

Таблица 7

Результаты измерений прочности на сжатие

	Эталонные (28 дней), МПа	Эталонные (24 месяца), МПа	Карбонизированные, МПа
Среднее	21,2	22,5	25,8
Стандартное отклонение	2,0	1,7	2,6
Коэффициент вариации, %	9,29	7,64	10,23

Средние результаты, полученные в ходе испытаний на прочность при сжатии, представлены в табл. 7.

Карбонизированные образцы показали более высокую прочность на сжатие, чем контрольные, при доверительном уровне 95 % при дисперсионном анализе. Это может свидетельствовать о влиянии уменьшения пористости, вызванного кристаллизацией продуктов процесса карбонизации, что приводит к увеличению механической прочности; этот эффект также наблюдался в работах Banfill [5], Morandeau и др. [32], Cui и др. [31].

3.3. Электрохимическая реалкализация

На рис. 5 приведены фотографии образцов, покрытых раствором фенолфталеина. На рис. 5а представлен материал, подвергнутый воздействию тока $0,5 \text{ А/м}^2$ в течение 7 дней. Образцы, подвергшиеся реалкализации в течение 14 дней при токе $0,5 \text{ А/м}^2$, показаны на рис. 5б, а образцы, выдержанные в течение 21 дня при том же токе, на рис. 5в.

Образцы, подвергшиеся воздействию тока $1,0 \text{ А/м}^2$ в течение 7 и 14 дней, показаны на рис. 5з и д. Образцы, подвергавшиеся в течение 7 дней воздействию тока $1,5 \text{ А/м}^2$, показаны на рис. 5е.

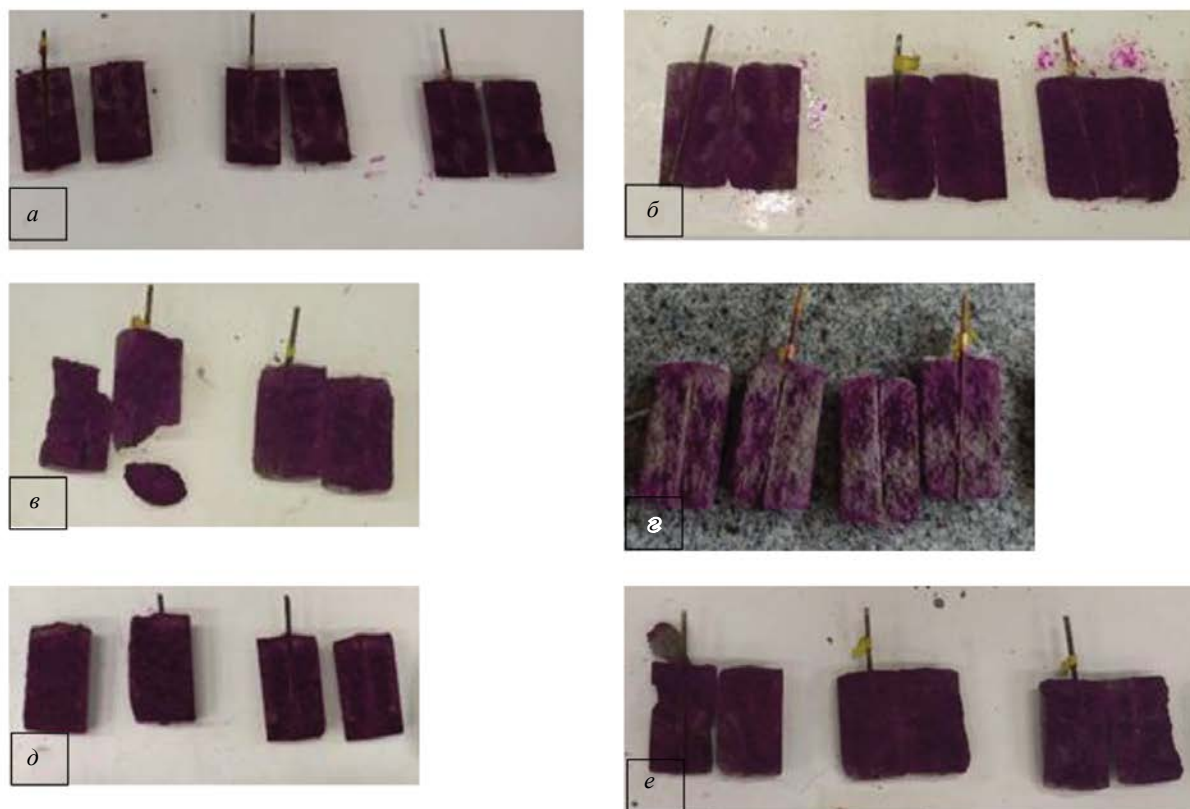


Рис. 5. Реалкалинизованные образцы: 7 дней — $0,5 \text{ А/м}^2$ (а); 14 дней — $0,5 \text{ А/м}^2$ (б); 21 дней — $0,5 \text{ А/м}^2$ (в); 7 дней — $1,0 \text{ А/м}^2$ (з); 14 дней — $1,0 \text{ А/м}^2$ (д); 7 дней — $1,5 \text{ А/м}^2$ (е).

На рис. 5 видно, что при всех плотностях тока и времени работы системы образцы приобрели карминово-красный цвет, что свидетельствует о восстановлении щелочного pH и эффективности процесса электрохимической реалкализации, а при сравнении с рис. 4 видно, что произошло изменение цвета от бесцветного, что свидетельствует о pH ниже 10, до карминово-красного, что свидетельствует о pH выше 11.

На рис. 5а—в показано поведение образцов, подвергнутых воздействию тока силой 0,5 А/м² в течение 7, 14 и 21 дня соответственно, и можно заметить, что уже через 7 дней после нанесения раствора фенолфталеина наблюдалось изменение цвета. Через 14 дней использования способа почти все сечение уже подверглось реалкализации, а через 21 день весь бетон уже восстановился. González и др. [3] также наблюдали начало восстановления щелочности системы через 5 дней после применения метода, а полное восстановление — через 13 дней.

На рис. 5г, д показаны образцы, подвергнутые воздействию тока 1,0 А/м² с периодом приложения 7 и 14 суток соответственно, где также можно наблюдать начало процесса реалкализации с 7 суток, а на 14 сутки уже произошло восстановление по всему сечению образцов. На рис. 5е показан процесс восстановления при подаче тока 1,5 А/м² с периодом приложения 7 дней, где наблюдается полное восстановление образца.

Между образцами 1—6 имеются различия в цвете, что может свидетельствовать о том, что последовательное подключение образцов к одному источнику постоянного тока не столь эффективно. Например, при токе 0,5 А/м², подаваемом в течение 21 дня, образец 1 имеет розоватый цвет в своей внешней области, что свидетельствует об эффективности процесса химической реалкализации, происходящего от поверхности к внутренней части за счет проникновения щелочного раствора в цементную матрицу.

Образцы 2—4 имеют более однородный цвет по всей длине, что свидетельствует о действии как химического, так и электрохимического процессов реалкализации. С другой стороны, образцы 5 и 6 имеют розовый цвет только в области вокруг арматуры и у основания образца, что указывает на изменение pH в щелочную сторону в результате электрохимической реалкализации и влияние химической реалкализации за счет капиллярного впитывания раствора на дне емкости, куда были помещены образцы.

Учитывая, что образцы 1 и 6 являются точками соединения цепи с источником постоянного тока, можно предположить, что эти точки соединения влияют на работу системы. Аналогичные условия наблюдаются и в других группах образцов, подвергнутых реалкализации, однако с меньшим временем применения. Yeih и Chang [1] также наблюдали увеличение pH с увеличением времени применения или с увеличением приложенного тока в системе электрохимической реалкализации.

3.4. Ртутная интрузионная порозитометрия (МИП)

Результаты испытаний методом ртутной интрузионной порозитометрии, проведенных на образцах 1, 3 и 6, подвергнутых электрохимической реалкализации в течение 14 дней, в среднем приведены в табл. 8.

Таблица 8

Ртутная интрузионная порозитометрия (МИП)

Образец	0,5 А/м ²	1,0 А/м ²	1,5 А/м ²
Среднее	3,15	3,74	4,15
Стандартное отклонение	0,44	0,60	1,04
Нижний предел	2,71	3,14	3,11
Верхний предел	3,59	4,33	5,18
Карбонизированные	2,72		
Эталонные	3,29		

Можно заметить, что процесс карбонизации уменьшил пористость цементной матрицы, что соответствует поведению, наблюдаемому Morandau и др. [32] и Cui и др. [31]. Применение электрохимической реалкализации привело к увеличению пористости, что также было отмечено

Reou и Ann [16]. Исключение составили образцы, подвергнутые току $0,5 \text{ A/m}^2$, которые по результатам дисперсионного анализа с доверительной вероятностью 95 % имели ту же пористость, что и контрольные, и газированные образцы. Однако другие приложенные токи привели к увеличению пористости с тем же уровнем достоверности.

Учитывая, что пористость карбонизированного образца статистически равна пористости образца А, можно полагать, что плотность тока $1,0 \text{ A/m}^2$ представляет собой переходное значение, начиная с которого частицы карбоната кальция, образовавшиеся в процессе карбонизации, начинают реагировать за счет процессов реалкализации, увеличивая пористость цементной матрицы.

3.5. Термогравиметрический анализ (ТГА)

Результаты, полученные при проведении термогравиметрического анализа электрохимической реалкализации образцов групп «А» ($0,5 \text{ A/m}^2$), «В» ($1,0 \text{ A/m}^2$) и «С» ($1,5 \text{ A/m}^2$), внешней (лицевой) и внутренней (арматурной) частей образцов, приведены на рис. 6.

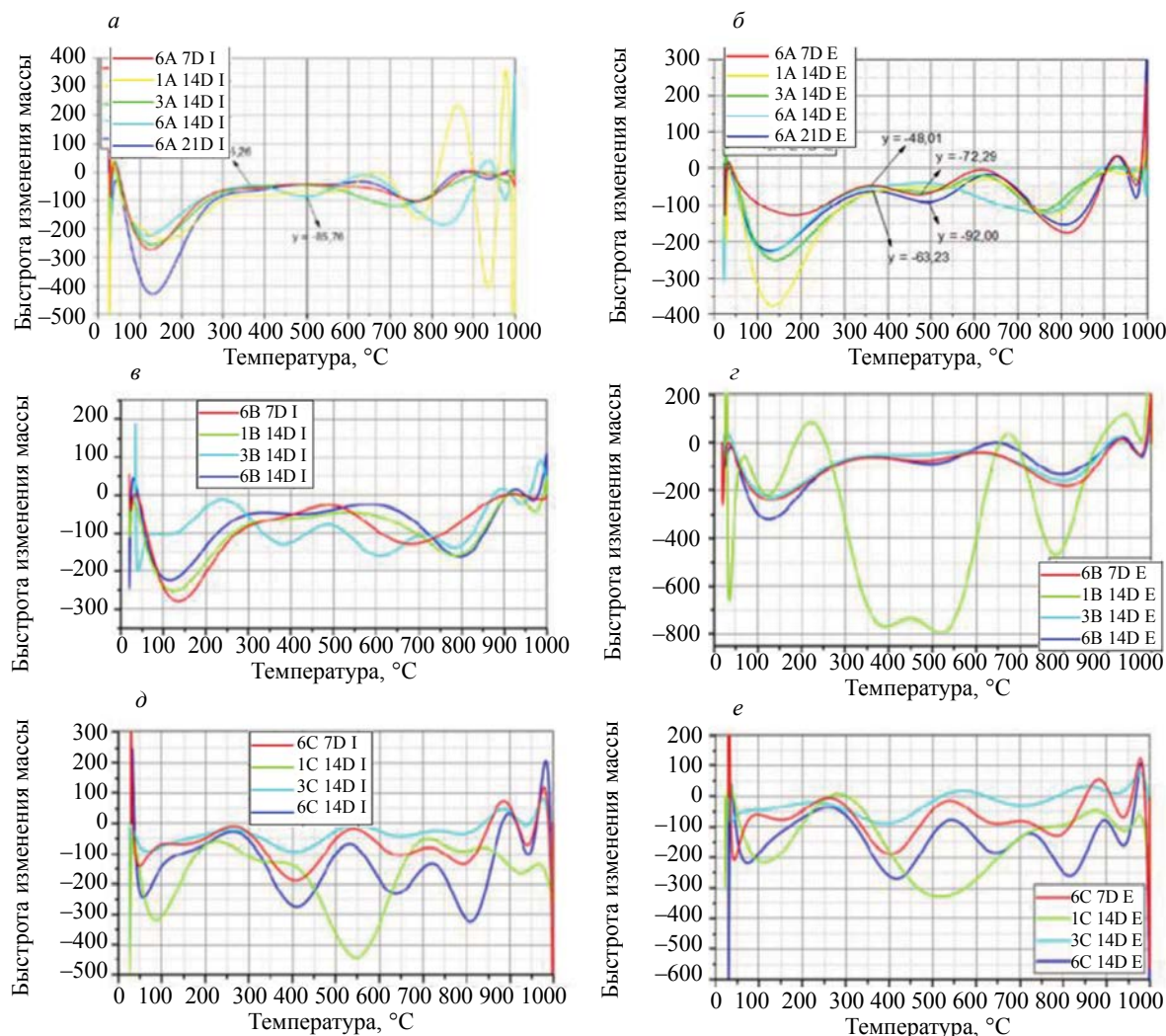


Рис. 6. Результаты ТГА.

На рис. 6а, б показаны потери массы образцов, подвергнутых процессу электрохимической реалкализации при плотности тока $0,5 \text{ A/m}^2$ в течение 7, 14 и 21 суток в области контакта со стальными стержнями (см. рис. 6а) и с лицевой стороны образца (см. рис. 6б), где можно наблю-

дать большее изменение массы при температуре, близкой к 800 °С, что свидетельствует о наличии CaCO_3 , и меньшее количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$, изменение массы которого происходит при температуре, близкой к 450 °С. В образце в области, близкой к арматуре, можно наблюдать изменение массы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при сроке 14 сут., что свидетельствует о начале процесса реалкализации, а в образце с лицевой стороны образца это изменение можно наблюдать уже при сроке 7 сут. Эти результаты согласуются с исследованиями Dos Reis и др. [33] и Tam и др. [34], которые отмечают, что в карбонизированных образцах больше CaCO_3 и меньше $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что также согласуется с результатами Gonzalez и др. [3], которые указывают на начало восстановления с 5 сут.

На рис. 6в, г показаны результаты образцов с армированием и лицевой поверхностью, подвергнутых воздействию плотности тока 1 А/м², а на рис. 6д, е — образцы, подвергнутые воздействию плотности тока 1,5 А/м², и во всех случаях можно наблюдать увеличение потери массы в диапазоне температур 450 °С, что указывает на увеличение количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$, продукта, образующегося в процессе реалкализации, что согласуется с результатами, полученными Reou и Ann [16], которые также наблюдали увеличение количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в результате электрохимической реалкализации.

3.6. Потенциометрия ионоселективными электродами

Образцы карбонизированного бетона до электрохимической реалкализации имели в среднем pH, равный 9,3. После процесса реалкализации было установлено, что pH растворов изменяется от 11,5 для образцов, выдерживаемых при токе 0,5 А в течение 7 суток, до 13,3 для образцов, выдерживаемых при токе 1,5 А в течение 7 суток.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы было изучение влияния плотности тока и длительности его применения на эффективность метода электрохимической реалкализации цементных матриц.

Качественный аэрозольный тест фенолфталеина показал схожие результаты между группами, что свидетельствует о том, что приложение плотности и силы тока 0,5 А/м² уже на 7 сутки было бы достаточно для начала процесса восстановления части pH. Несмотря на это, одного фенолфталеинового теста оказалось недостаточно для определения влияния изменения силы электрического тока и времени применения методики на ее способность восстанавливать щелочность пасты.

Испытание методом ртутной интрузионной порозиметрии показало, что увеличение плотности тока приводит к увеличению пористости материала. Статистически значимая разница наблюдалась только между плотностями тока 0,5 и 1,5 А/м², что указывает на то, что плотность тока 1,0 А/м² является переходной зоной между наименее эффективным значением тока и наиболее эффективным в плане обратимой карбонизации.

Результаты термогравиметрического анализа, подтверждающие результаты порозиметрических испытаний, показывают наибольшие потери массы после температуры 400 °С при плотности тока 1,5 А/м², что свидетельствует о том, что чем больше плотность тока, тем больше изменения в микроструктуре бетона.

При количественном определении pH была подтверждена реалкализация всех образцов для всех плотностей тока, причем при токе 1,5 А/м² наблюдались более высокие значения pH.

Авторы благодарят Многопользовательский центр по определению характеристик материалов UTFPR-CT—CMCM за проведение испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yeih W., Chang J.J. A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete // Construction and building materials. 2005. No. 19. P. 516—524.
2. Broomfield J.P. Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair / 2 ed. Taylor & Francis group, New York. 2007.
3. González F., Fajardo G., Arliguie G., Juárez C.A., Escadeillas G. Electrochemical realkalisation of carbonated concrete: an alternative approach to prevention of reinforcing steel corrosion // International Journal of Electrochemical Science. 2011. No. 6. P. 6332—6349.
4. Papadakis V.G., Vayenas C.G., Fardis M.N. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem // Chemical Engineering Science. 1991. V. 46. No. 5/6. P. 1333—1338.
5. Banfill P.F.G. Features of the mechanism of electrolytic re-alkalisation and desalination treatments for reinforced concrete / In: Rn. Swamy (ed.), corrosion and corrosion protection of steel in concrete: proceedings of the international conference, 1994. P. 1489—1498, sheffield academic press.

6. *Mietz I.J.* Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures // *Materials and Corrosion*. 1995. No. 46. P. 527—533.
7. *Daniyal M., Akhtar S.* Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation* 5:1. 2020. <https://doi.org/10.1007/s41024-019-0067-3>
8. *Rocha A.K.A., Diniz H.A.A., Anjos M.A.S., Barbosa N.P., Araujo A.R.C.* Estudo da carbonatação acelerada em argamassas de cimento com elevados teores de adições minerais. 2021. rct v.7.
9. *Silva R.G.R., Magalhães A.G., Campos C.A., Silva I.R.* Assessment of the effect of changes in consolidation conditions in the advance of the carbonation front in cementitious matrix composites // *Rev. Ibracon Estrut. Mater.* 2021. V. 14. No. 5. e14512.
10. *Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., Santos A.C.P.* CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: a case study // *Case Studies In Construction Materials*. 2017. No. 6. P. 147—161.
11. *Vu T.H., Pham G., Chonier A., Brouard E., Rathnarajan S., Pillai R., Gettu R., Santhanam M., Aguayo F., Folliard K.J., Thomas M.D., Moffat T., Shi C., Sarnot A.* Impact of different climates on the resistance of concrete to natural carbonation // *Construction and Building Materials*. 2019. No. 2016. P. 450—467.
12. *González J.A., Cobo A., González M.N., Otero E.* On the effectiveness of realkalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures // *Material and Corrosion*. 2000. No. 51. P. 97—103.
13. *Miranda J.M., González J.A., Cobo A., Otero E.* Several questions about electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures // *Corrosion Science*. 2006. No. 48. P. 2172—2188.
14. *Bertolini L., Carsana M., Redaelli E.* Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation / In: *Proceedings of the 2nd Fib International Congress*. 2006.
15. *Bertolini L., Carsana M., Redaelli E.* Conservation of historical reinforced concrete structures by means of electrochemical realkalisation // *Journal Of Cultural Heritage*. 2008. No. 9. P. 376—385.
16. *Reou J.S., Ann K.Y.* The distribution of hydration products at the steel-concrete interface for concretes subjected to electrochemical treatment // *Corrosion Science*. 2010. No. 52. P. 2197—2205.
17. *Ribeiro P.H.L.C., Meira G.R., Ferreira P.R.R., Perazzo N.* Electrochemical realkalisation of carbonated concretes: influence of material characteristics and thickness of concrete reinforcement cover // *Construction and Building Materials*. 2013. No. 40. P. 280—290.
18. *Zou Z., Wu J., Yu W., Wang Z.* Influence of mineral admixture on the electrochemical realkalisation of carbonated concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. V. 29.
19. *Khan M.I., Lynsdale C.J.* Strength, permeability and carbonation of high-performance concrete // *Cement and Concrete Research*. 2002. No. 32. P. 123—131.
20. *Kurda R., Brito J., Silvestre J.D.* Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO₂ // *Journal of CO₂ Utilization*. 2019. No. 29. P. 12—19.
21. *Aguirre-Guerrero A.M., Gutiérrez R.M.* Efficiency of electrochemical realkalisation treatment on reinforced blended concrete using ftir and tga // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 193. P. 518—528.
22. *Tissier Y., Bouteiller V., Marie-Victoire E., Joiret S., Chaussadent T., Tong Y.* Electrochemical chloride extraction to repair combined carbonated and chloride contaminated reinforced concrete // *Electrochimica Acta*. 2019. No. 317. P. 486—493.
23. *Zhu P., Zhang J., Qu W.* Long-term effects of electrochemical realkalization on carbonated concrete // *Front. Struct. Civ. Eng.* 2020. V. 14 (1). P. 127—137 <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0583-x>
24. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Nbr 7211: Agregados para concreto — especificação. Rio de Janeiro. 2019.
25. *Lachovicz P.O.* Influência do tipo de malha e do tipo de argamassa na realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado, Dissertação De M. Sc., Ppgc/Ufpr, Curitiba, Pr, Brasil. 2019.
26. Associação brasileira de normas técnicas. Nbr 6118: Projeto De Estruturas De Concreto — Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.
27. Associação brasileira de normas técnicas. Nbr 7215: Cimento portland — determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2019.
28. Associação brasileira de normas técnicas. Nbr 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 2005.
29. Associação brasileira de normas técnicas. Nbr 5739: Concreto — ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.
30. *Zhan B.J., Xuan D.X., Zeng W., Poon C.S.* Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2019. No. 104. P. 103360.
31. *Cui H., Tang W., Liu W., Dong Z., Xing F.* Experimental studies on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms // *Construction and Building Materials*. 2015. No. 93. P. 522—527.
32. *Morandau A., Thiéry M., Dangla P.* Investigation of the carbonation mechanism of ch and c-s-h in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties // *Cement and Concrete Research*. 2014. No. 56. P. 153—170.

33. *Dos Reis G.S., Thue P.S., Cazacliu B.G., Lima E.C., Sampaio C.H., Quattrone M., Ovsyannikova E., Kruse A., Dotto G.L.* Effect of concrete carbonation on phosphate removal through adsorption process and its potential application as fertilizer // *Journal of Cleaner Production*. 2020. No. 256. P. 120416.

34. *Tam V.W.Y., Butera A., Le K.N.* Microstructure and chemical properties for CO₂ concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 262. P. 120584.

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЕГКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. И.А. Кишин^{1,2,*}, Е.Ю. Киданова^{1,**}, А.С. Кубанкин^{1,2,***}, В.С. Сотникова^{3,****}

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ БелГУ), Россия
308015 Белгород, ул. Победы, 85

² Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),
Россия 119991 Москва, Ленинский проспект, 53

³ Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова (БГТУ),
Россия 308012 Белгород, ул. Костюкова, 46

E-mail: *ivan.kishin@mail.ru; **28kidanova28@gmail.com;
askubankin@gmail.com; *levultra@gmail.com

Поступила в редакцию 14.06.2023; после доработки 01.09.2023

Принята к публикации 04.09.2023

Описана методика неразрушающего контроля для исследования конструктивных элементов, изготовленных из легких материалов. Методика основана на анализе спектров мягкого рентгеновского излучения. Приведены результаты испытаний для трубы, изготовленной из углепластика, со средней толщиной стенки 1 мм. Показана возможность построения карт распределения толщин стенки трубы с точностью выше 10 мкм.

Ключевые слова: рентгеновская дефектоскопия, мягкое рентгеновское излучение, полупроводниковый детектор, определение толщины, методика неразрушающего контроля.

QUALITY CONTROL TECHNIQUE FOR STRUCTURAL ELEMENTS FROM LIGHTWEIGHT MATERIALS BASED ON SOFT X-RAY RADIATION

I.A. Kishin^{1,2,*}, E.Y. Kidanova^{1,**}, A.S. Kubankin^{1,2,***}, V.S. Sotnikova^{3,****}

¹Belgorod State National Research University (NRU BelSU),
Pobedy str., 85, Belgorod, 308015, Russia

²Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (FIAN),
Leninsky Ave., 53, Moscow, 119991, Russia

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (NRU BelSU),
Kostyukova str., 46, Belgorod, 308012, Russia

The paper describes a quality of non-destructive testing for the study of structural elements made of lightweight materials. The quality is based on the analysis of soft X-ray spectra. The test results for a pipe made of carbon fiber with an average wall thickness of 1 mm are presented. The possibility of constructing maps of the distribution of pipe wall thicknesses with an accuracy above 10 microns is shown.

Keywords: X-ray flaw detection, soft X-ray radiation, semiconductor detector, thickness determination, non-destructive testing technique.

DOI: 10.31857/S0130308223100044, EDN: WZRLYQ

ВВЕДЕНИЕ

Контроль прочностных и массогабаритных характеристик конструктивных элементов является обязательной процедурой при разработке деталей установок. В настоящее время широко используются следующие методы неразрушающего контроля качества конструкций [1—12]: акустико-эмиссионный, акустический, рентгеновский, термография, гидравлическое испытание, широкоспектральная и т.д. Выбор метода дефектоскопии зависит от свойств исследуемого объекта и требуемой точности результата.

На данный момент самым распространенным методом контроля качества трубопроводов из легких композитных материалов является акустико-эмиссионный метод дефектоскопии, основанный на обнаружении и анализе акустических волн, генерируемых дефектами внутри образца.

Из всех имеющихся методов дефектоскопии отдельного внимания заслуживает рентгенодефектоскопия [10, 11], которая наравне с акустико-эмиссионным методом [12] может использоваться непосредственно в процессе производства исследуемых конструкций. Однако, в отличие от метода акустической эмиссии, рентгенодефектоскопия позволяет обнаруживать дефекты как на поверхности, так и внутри материала. Преимуществом рентгенодефектоскопии является ее применимость к широкому кругу материалов, включая металлы, пластик и различные виды композитов. Проведение испытаний с помощью рентгеновского излучения практически не зависит от внешних факторов, таких как влажность, температура и освещение.

В большинстве случаев рентгенодефектоскопия применяется для проверки целостности и пригодности металлических конструкций, например, сварных швов трубопроводов [13]. При этом актуальной задачей остается разработка новых способов реализации метода рентгенодефектоскопии для трубопроводов из легких композитных материалов.

В настоящей работе описана новая методика неразрушающего рентгеновского контроля и разработан экспериментальный стенд для исследования конструктивных элементов, изготовленных из легких материалов. Методика основана на анализе характеристических пиков в области спектра мягкого рентгеновского излучения. Установка работает в энергетическом диапазоне от 1 до 10 кэВ в режиме энергодисперсионного анализа сигнала рентгеновского излучения, прошедшего через исследуемый объект и рассеянного объектом. Тестовые испытания, выполненные на трубе диаметром 48,4 мм и со средней толщиной стенки 1 мм, изготовленной из углепластика (карбон), показали возможность построения карт распределения толщин стенки трубы с точностью выше 10 мкм.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ

При прохождении рентгеновского излучения через слой вещества интенсивность прошедшего через материал излучения уменьшается относительно начальной за счет рассеяния и поглощения в этом веществе. Для определения интенсивности монохроматического излучения, прошедшего через слой рассматриваемого вещества, используют следующее выражение:

$$N = N_0 \times e^{-\mu \times L}, \quad (1)$$

где N_0 — интенсивность первичного рентгеновского излучения; L — толщина поглощающего слоя вещества; μ — линейный коэффициент ослабления, определяемый по формуле $\mu = 1/L_{abs}$, где L_{abs} — длина фотопоглощения монохроматического рентгеновского излучения.

Если известен начальный поток рентгеновского излучения и поток излучения после прохождения его через слой рассматриваемого вещества, с помощью выражения (1) для определенной энергии излучения можно вычислить толщину ослабляющего слоя L , используя следующее уравнение:

$$L = -\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \times L_{abs}. \quad (2)$$

Выражение (2) можно использовать для определения толщины исследуемого объекта, подобрав энергию рентгеновского излучения таким образом, чтобы обеспечить его частичное поглощение материалом.

В работе была исследована труба, изготовленная из углепластика, с внешним диаметром 48,4 мм и со средней толщиной стенки 1 мм. Для оценки требуемого спектрального диапазона был проведен модельный расчет, в котором полагалось, что рассматриваемая труба полностью состоит из углерода с плотностью 1,6 г/см³. На рис. 1 представлены результаты модельного расчета длин фотопоглощения рентгеновского излучения в спектральном диапазоне 1—10 кэВ для углерода. Также пунктирной линией обозначена зависимость длины фотопоглощения от энергии излучения для пленки полиэтилентерефталата (майлар) с плотностью 1,4 г/см³. Из представленных данных видно, что длины фотопоглощения майлара и углерода близки по своему значению, поэтому в работе будем считать их идентичными. Обертывание трубы пленкой, изготовленной из майлара (толщина 40 мкм), позволило варьировать толщину стенки трубы и тем самым оценить разрешающую способность предлагаемой методики.

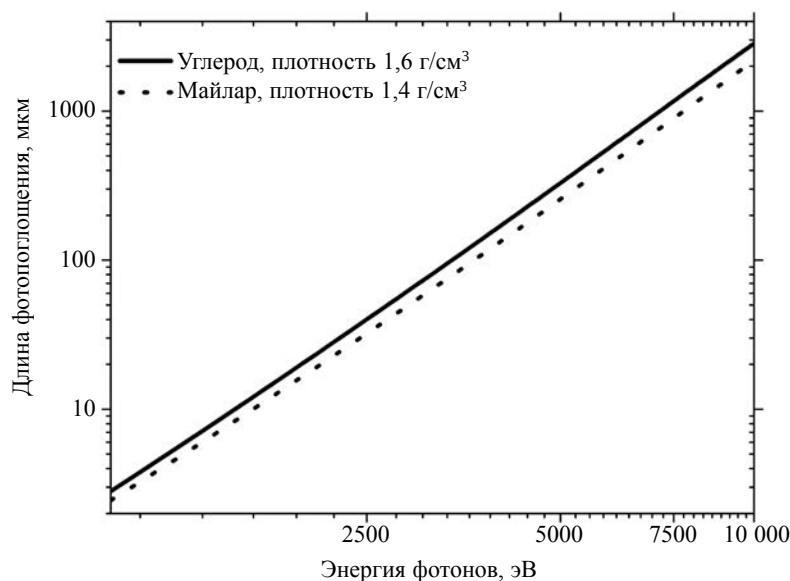


Рис. 1. Зависимость длины фотопоглощения рентгеновского излучения, сплошная линия — в углероде плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$, пунктирная линия — в майларе плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$, для расчета использовалась база данных [14].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Учитывая специфику данной методики, для определения толщины стенки трубы необходимо, чтобы в разработанной схеме измерений либо детектор, либо рентгеновский источник был размещен внутри исследуемой трубы. В связи с тем, что описываемая установка предполагает диагностику труб с малым диаметром, было решено использовать схему, в которой детектор размещен внутри трубы (рис. 2), что существенно облегчило процесс измерений.

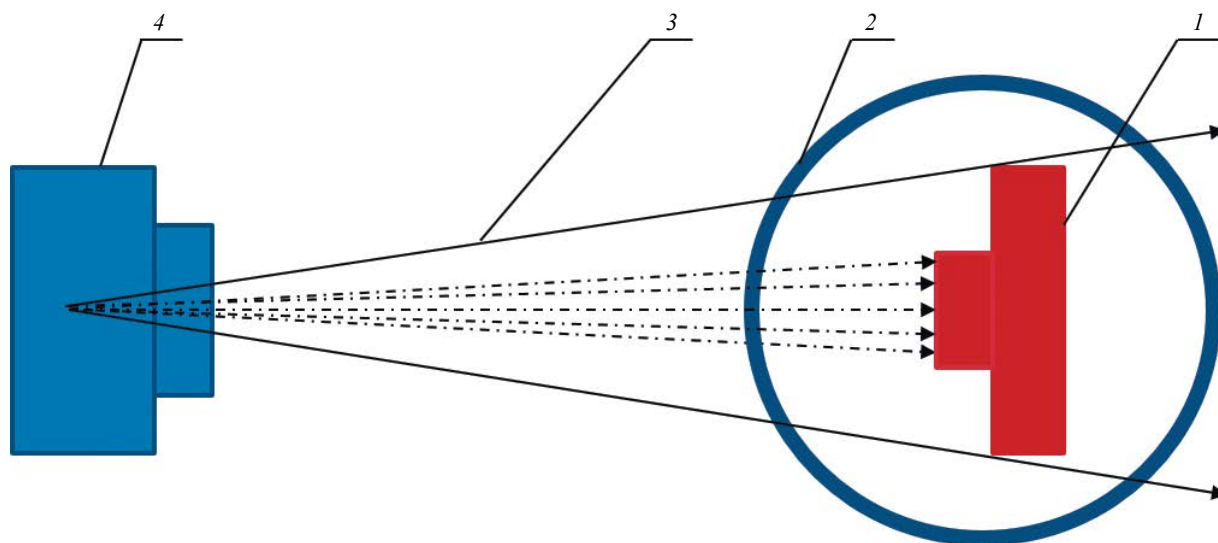


Рис. 2. Схема измерений: 1 — детектор; 2 — труба; 3 — рентгеновское излучение; 4 — рентгеновская трубка.

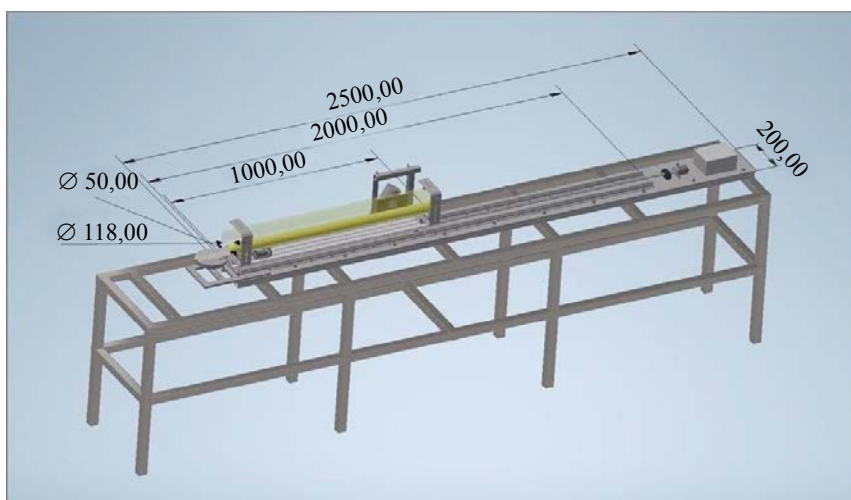


Рис. 3. Изображение экспериментального стенда.

Модель изготовленного стенда приведена на рис. 3. На плите размером $2,5 \times 0,2 \text{ м}^2$ размещены рельсы длиной 2 м, по которым происходит перемещение плиты длиной 1 м с помощью моторизованного привода. Детектор и рентгеновская трубка закреплены жестко таким образом, чтобы выходное окно рентгеновской трубки (РТ) было направлено на входное окно детектора.

Измерительный узел показан на рис. 4а. Диагностируемая труба (1) устанавливается на позицию для измерений таким образом, чтобы установленный на крепление (2) детектор (3) с коллиматором (4) полностью разместился в исследуемой трубе, на которую будет направлено рентгеновское излучение (5) от РТ (6). Осесимметричное вращение трубы осуществляется за счет специального роликового держателя (7) и моторизованного ролика (8), крепления позволяют устанавливать трубы с диаметром от 45 до 118 мм.

Управление моторизованными приводами выполняется с помощью установленного на плите силового драйвера, управление которым производится оператором в зависимости от выбранного режима измерений с помощью специализированного программного обеспечения (ПО), написанно-

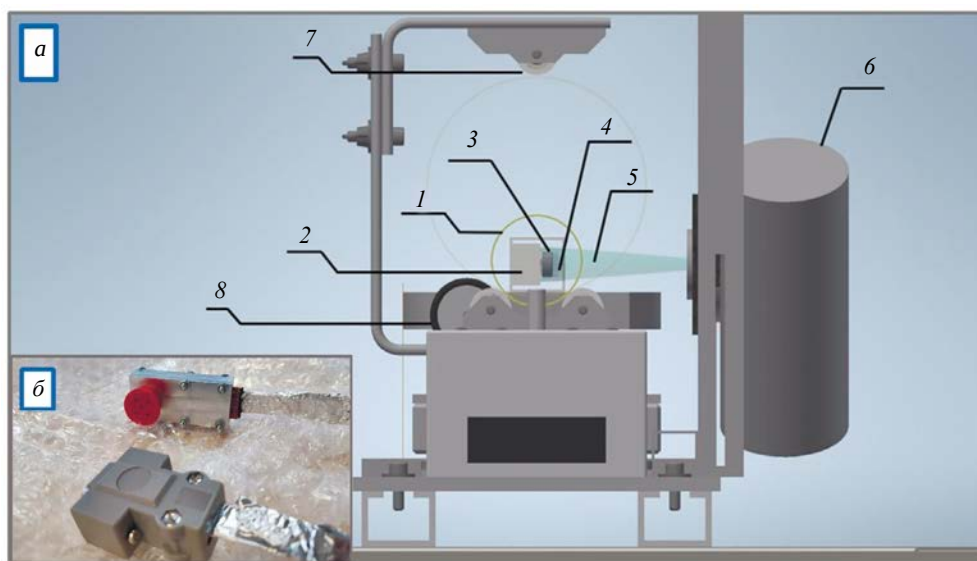


Рис. 4. Измерительный узел (а): 1 — диагностируемая труба; 2 — держатель детектора; 3 — рентгеновский спектрометр; 3 — свинцовый коллиматор; 5 — область рентгеновского излучения; 6 — рентгеновская трубка; 7 — роликовый держатель; 8 — привод вращательного движения; используемый детектор (б).

го специально для описываемой установки [15]. Созданная программа в режиме сканирования реализует вращение и линейное перемещение трубы, в то время как детектирующая система остается неподвижной. ПО позволяет задавать область сканирования, время и шаг одного измерения. С помощью ПО также осуществлялось управление рентгеновским детектором.

В описываемом экспериментальном стенде был использован рентгеновский спектрометр X-123 FastSDD комплектации OEM компании Amptek [16], состоящий из полупроводникового дрейфового детектора FastSDD с бериллиевым окном 12,5 мкм, предусилителя РА210 и платы управления DP5. Выбранный полупроводниковый детектор обладает высокой скоростью счета более 1 000 000 имп/с при сохранении высокого разрешения. Можно отметить, что ранее детектор хорошо себя зарекомендовал и использовался в экспериментальных работах по исследованию рентгеновского излучения на ускорительных комплексах релятивистских электронов [17] и ультра-релятивистских электронов [18]. В процессе проведения испытаний время формирования сигнала составляло 0,8 мкс, что обеспечивало эффективность регистрации фотонов более чем 95 % в спектральной области K_{α} -линий хрома. Дополнительно на спектрометр был установлен свинцовый коллиматор с апертурой 1 мм.

Корпус для детектора и предусилителя был изготовлен таким образом, чтобы входное окно детектора было направлено на выходное окно рентгеновской трубки, не препятствуя при этом перемещению трубы. Благодаря этому получилась компактная комплектация детектора, отличающаяся малыми габаритами $65 \times 25 \times 25$ мм³ и сохраняющая спектрометрические характеристики (рис. 4б). Созданный корпус позволяет проводить исследования труб с диаметром от 45 до 118 мм.

Исходя из результатов, продемонстрированных на рис. 1, и с учетом того, что толщина стенки исследуемой трубы может быть достаточно большой, а время измерений должно быть минимальным, оптимальным вариантом было использование РТ с хромовым анодом. Энергия характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) K_{α} -линии хрома соответствует значению 5,41 кэВ. Согласно проведенному моделированию, величина длины фотопоглощения в углероде для данной энергии составляет 430 мкм. В качестве источника рентгеновского излучения использовалась РТ фирмы Oxford Instruments 5000 серии с хромовым анодом [19], основные характеристики которой представлены в табл. 1. Во время эксперимента использовались следующие настройки РТ: ускоряющее напряжение 9 кВ, ток эмиссии 20 мкА. Расстояние от РТ до рентгеновского спектрометра составляло 130 мм.

Таблица 1

Характеристики рентгеновской трубки Oxford Instruments 5000 серии

Характеристики	Значения
Диапазон высокого напряжения	От 5 до 50 кВ
Максимальная мощность	50 Вт
Максимальный ток пучка	1,0 мА
Размер фокусного пятна	200 мкм
Материал и толщина окна	Ве, 127 мкм
Размеры	180 мм Д × Ø 70 мм
Анод	Хром

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТЕНДА

Определение длины фотопоглощения в материале. Тестовые испытания проводились на участке углепластиковой трубы с внешним диаметром 48,4 мм и средней толщиной стенки 1 мм. Поскольку точный элементный состав и плотность материала трубы были неизвестны, то на первом этапе испытаний были использованы следующие приближения: элементный состав трубы неизменный по всему объему, начальная толщина стенки равна 1 мм. Данные приближения могут быть использованы для оценки отклонения толщины стенки трубы на основе разработанного подхода.

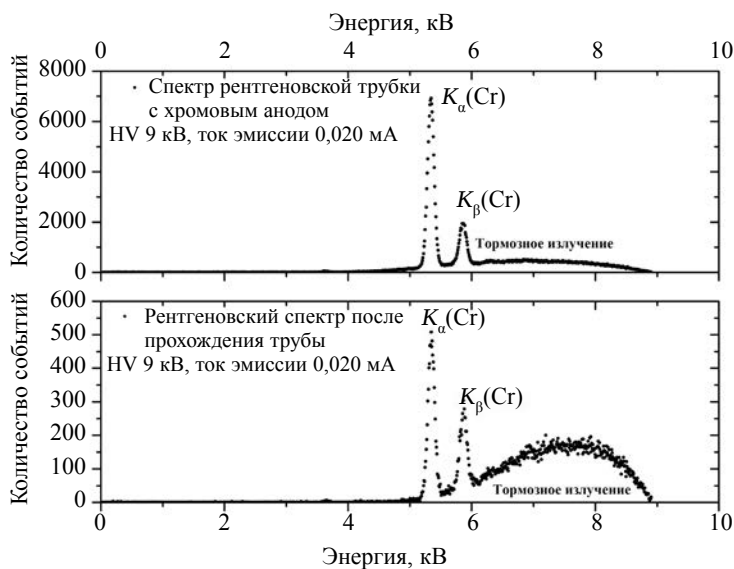


Рис. 5. Спектры рентгеновского излучения: спектр рентгеновской трубки (сверху); спектр излучения, прошедшего через стенку трубы (снизу).

Одной из характеристик рассматриваемой задачи является длина фотопоглощения в материале трубы. Для определения данной характеристики были выполнены измерения спектров рентгеновского излучения без стенки и излучения, ослабленного одной стенкой трубы. Стенка помещалась между РТ и рентгеновским спектрометром, при этом все остальные параметры проведения измерений были неизменными, а именно: геометрия измерений, размеры коллиматора, настройки рентгеновской трубки.

Измерение спектра РТ в отсутствие стенки, выполненное в течение 15 с, показало интегральное число фотонов 109997 и 36211 для K_α - и K_β -линий хрома соответственно. Аналогичные измерения с ослаблением излучения одной стенкой трубы продемонстрировали значения 8000 и 5625 соответственно. На рис. 5 представлены измеренные спектры. Стоит отметить, что результаты измерений показали высокое энергетическое разрешение рентгеновского спектрометра 110 эВ в области энергий от 4 до 6 кэВ, что позволяет разделить вклады K_α - и K_β -линий хрома.

Используя формулу (2) и учитывая, что $L \approx 1$ мм (толщина стенки трубы), находим длину фотопоглощения $L_{abs} = 382$ мкм для энергии фотонов 5,41 кэВ и $L_{abs} = 537$ мкм для 5,95 кэВ. Учитывая полученные результаты измерений и используя приближение, в котором полагается, что труба состоит только из углерода, с помощью базы данных [14] была определена плотность материала трубы, которая составила $\sim 1,75$ г/см³.

Определения толщины стенки углепластиковой трубы. В первой серии измерений толщины стенки трубы детектор находился на расстоянии 15 мм от торца трубы. Измерения спектра излучения, прошедшего через трубу, выполнялись в режиме сканирования по окружности с шагом по внешней поверхности трубы 1 мм, что соответствовало $2,368^\circ$ — труба вращалась вокруг собственной оси при неизменном положении рентгеновской трубки и рентгеновского спектрометра. Геометрия эксперимента позволила выполнить измерение средней толщины цилиндрического фрагмента стенки трубы диаметром около 1 мм. С учетом того, что длина окружности внешней поверхности трубы равна 152 мм, для полного сканирования было необходимо провести 152 измерения. Для проверки корректности полученных результатов количество измеряемых точек было увеличено на 7, что позволило сопоставить первые и последние 7 точек измерений, которые должны быть идентичными. Перед началом измерений фиксировалось положение визуально наблюдаемой области трубы, в которой предположительно был продольный шов. Данная область имела форму полосы и визуально наблюдалась вдоль поверхности трубы с одной или двух сторон в зависимости от участка трубы. Результаты измерений суммарного числа фотонов K_α -линий хрома для каждой точки сканирования представлены на рис. 6а.

Из представленных результатов видна неоднородность зарегистрированного сигнала, при этом максимум распределения наблюдается в области шва, что указывает на пониженную плотность вещества, т.е. уменьшение толщины стенки трубы или наличие каких-либо дефектов. Также

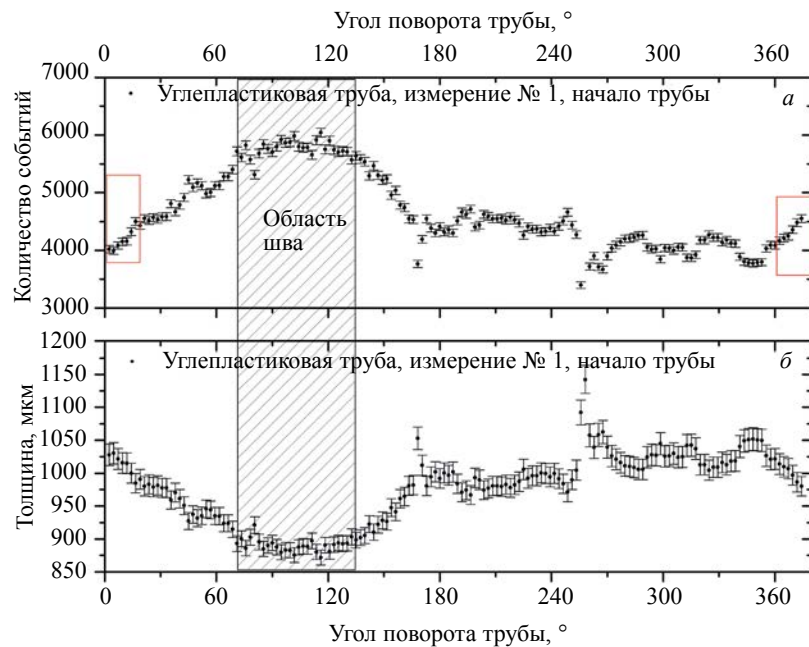


Рис. 6. Серия измерений № 1: *a* — результаты измерений суммарного числа фотонов K_{α} -линий хрома для каждой точки сканирования трубы из углепластика; *б* — результаты измерений толщины стенки трубы из углепластика, выполненные на основе поглощения K_{α} -линий хрома. Красные прямоугольники — перекрывающиеся при вращении трубы области измерений.

можно отметить хорошую повторяемость результатов для перекрываемых областей (прямоугольники) по форме и уровню сигнала. Пересчет результатов измерений в толщину стенки с помощью формулы (2) дает результаты, представленные на рис. 6б.

Во второй серии измерений расстояние от края трубы до детектора составляло 130 мм. Измерения проводились аналогично первой серии измерений, полученные данные суммарного числа фотонов K_{α} -линий хрома для каждой точки сканирования представлены на рис. 7а. На рис. 7б представлен

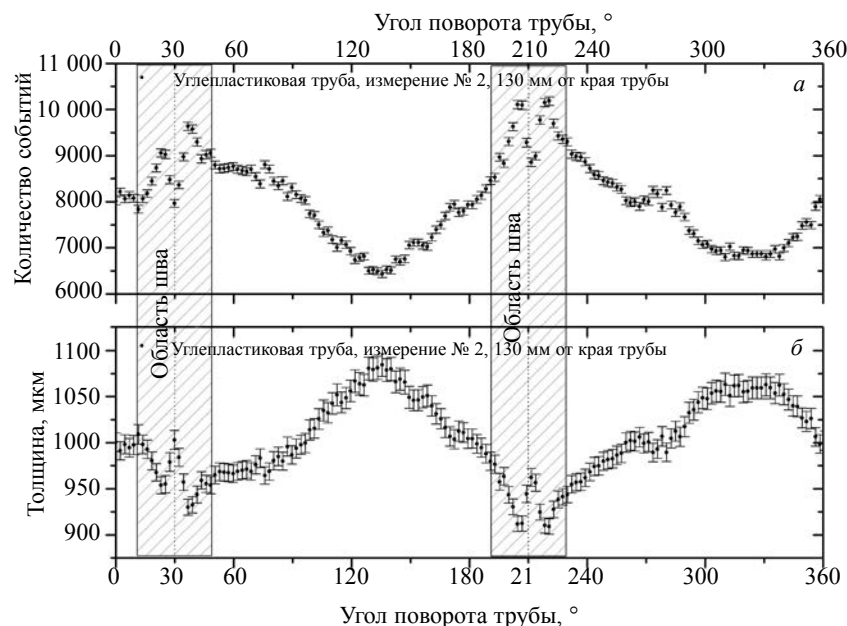


Рис. 7. Серия измерений № 2: *a* — результаты измерений суммарного числа фотонов K_{α} -линии хрома для каждой точки сканирования трубы из углепластика; *б* — результаты измерений толщины стенки трубы из углепластика, выполненные на основе поглощения K_{α} -линий хрома.

результат пересчета по формуле (2) в величину толщины стенки трубы. Погрешность измерений составила 10 мкм. Представленные зависимости показывают схожий характер распределения концентрации вещества в стенке трубы с результатами первой серии эксперимента, за исключением появления второго пика в измеренном распределении. Расстояние между двумя пиками составило 180° .

Задачей третьей серии измерений являлась проверка чувствительности предлагаемого подхода. В измерениях использовались настройки, идентичные второй серии измерений. Для решения данной задачи внешняя поверхность трубы была обернута одним слоем пленки майлара толщиной 60 мкм, при этом между смыкающимися краями был оставлен промежуток около 2 мм. Результаты измерений приведены на рис. 8а.

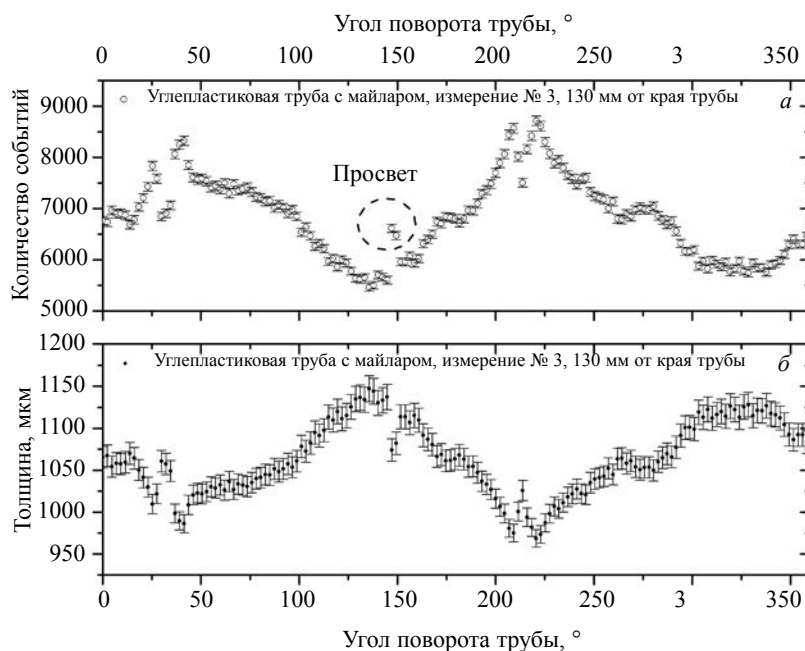


Рис. 8. Серия измерений № 3: а — результаты измерений суммарного числа фотонов K_α -линий хрома для каждой точки сканирования трубы из углеродистика; б — результаты измерений толщины стенки трубы из углеродистика, выполненные на основе поглощения K_α -линий хрома.

Положение трубы, при котором рентгеновское излучение взаимодействовало с промежутком, оставленным в месте стыка краев пленки майлара, можно определить по увеличению числа событий на кривой на рис. 8а (обозначено овалом). Видно, что в данной области число зарегистрированных фотонов резко возрастает: на графике отчетливо продемонстрировано, что разница пика с подложкой составляет около 5 статистических ошибок, что достаточно для убедительной интерпретации полученных данных.

Результат расчета величины толщины стенки трубы, выполненного по формуле (2) с допущением, что фотопоглощение в майларе и трубе одинаковое для данной энергии, представлен на рис. 8б. Измеренная максимальная толщина стенки трубы, обернутой майларом, равна $1,14 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$, а минимальная толщина $0,96 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$. В случае, когда измерялась только труба, максимальная толщина трубы составила $1,08 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$, а минимальная толщина составила $0,90 \text{ мм} \pm 10 \text{ мкм}$.

При тех же режимах работы экспериментального стенда был просканирован участок трубы длиной 70 мм. Сканирование проходило в автоматическом режиме, используя программу, описанную выше. Полученная тепловая карта представлена на рис. 9. Полученное изображение указывает на наличие неоднородности трубы, а именно на присутствие двух продольных швов и осесимметричного «порожка» высотой $\sim 2 \text{ мм}$, толщина которого дополнительно измерялась штангенциркулем. На рис. 9 продольным швам соответствует светлоголубая область, а «порожку» — красная.

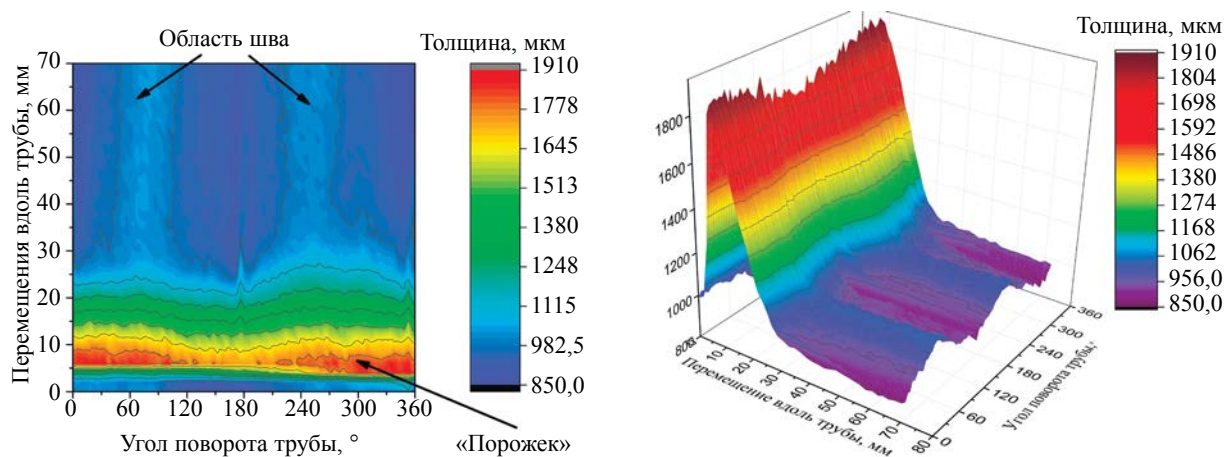


Рис. 9. Серия измерений № 4: автоматическое сканирование участка трубы: продольные швы — светлоголубая область, «порожек» — красная область.

ВЫВОДЫ

Разработана новая методика неразрушающего контроля [20] для исследования конструкционных элементов, изготовленных из легких материалов. Апробация методики, выполненная на созданном экспериментальном стенде, предоставила возможность выполнять измерения толщины стенки труб из углепластика с требуемой чувствительностью. В частности, для трубы длиной 100 см, внешним диаметром 48 мм и средней толщиной стенки 1 мм, изготовленной из углепластика, проведенные измерения демонстрируют разброс толщины стенки трубы в пределах ± 100 мкм от средней толщины, не учитывая «порожек» высотой 2 мм. Были обнаружены корреляции областей с уменьшенной толщиной стенки и расположением «швов» трубы. Показано, что чувствительность измерений может достигать разрешения исследуемой толщины стенки труб порядка 10 мкм при пространственном разрешении 0,78 мм² и времени измерения толщины одной области трубы порядка 10 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части государственного задания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020—0032 (2019—1569).

Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials // *Procedia Structural Integrity*. 2016. V. 1. P. 50—57.
2. Jian Chen, Zhenyang Yu, Haoran Jin. Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in fiber-reinforced polymer composites: A review // *Sec. Polymeric and Composite Materials*. 2022. V. 9.
3. Нагинаев К.Е., Савельев В.Н. Акустико-эмиссионный контроль трубопроводной модели при циклическом и статическом нагружении // *Известия вузов. Машиностроение*. 2007. № 6. С. 54—57.
4. Данилов В.Н., Ушаков В.М., Рымкевич А.И. Исследование возможностей оценки состояния структуры металла трубопроводов, находившихся в эксплуатации, ультразвуковым методом // *Дефектоскопия*. 2021. № 8. С. 3—13.
5. Князюк Л.В., Круглова Е.В. Определение размеров дефектов сварных соединений по сканированным рентгеновским снимкам // *Дефектоскопия*. 2004. С. 71—75.
6. Fernandes H., Hai Zhang, Figueiredo A., Ibarra-Castaneda C., Gilmar Guimaraes, Maldague X. Carbon fiber composite inspection and defect characterization using active infrared thermography: numerical simulations and experimental results // *Applied Optics*. 2016. V. 55. No. 34.
7. Варпанов А.З., Набатов В.В. Термографический контроль для строительства (обзорная статья) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № 9. С. 192—200.
8. Гулинин Д.А., Битаева М.В., Гундорова И.Г., Еговцева В.А. Особенности проведения гидравлических испытаний трубопроводов в условиях отрицательных температур окружающей среды // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2021. № 5—6. С. 54—59.

9. Benedet E., Fantin V., Willeman P., Junior A., Schmitz C., Cibra d'Almeida F., Soares S., Lana D., Perut V. The use of Shearography technique to evaluate polymeric composite repairs — case study // *Revista Materia*. 2017. V. 22. No. 2.
10. Тарасов С.Ю., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Гнусов С.Ф., Кудинов Ю.А. Рентгеноскопия дефектов типа стыковой линии в сварном шве, полученном методом сварки трением с перемешиванием // *Дефектоскопия*. 2015. № 9. С. 61—69.
11. Потрахов Н.Н., Жамова К.К., Бессонов В.Б., Грязнов А.Ю., Ободовский А.В. Технология оперативного рентгеновского контроля изделий из полимерных композиционных материалов // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2015. № 43. С. 97—115.
12. Елизаров С.В., Терентьев Д.А., Медведев К.А., Иванов В.И., Халимов А.Г., Бардаков В.В. Акустико-эмиссионная диагностика стеклопластиковых труб и фитингов // *Контроль. Диагностика*. 2021. Т. 24. № 1. С. 12—25.
13. Шлеенков А.С., Новгородов Д.В., Коновальчук В.О. Исследование дефектов продольного сварного шва трубы // *Физика. Технологии. Инновации: сборник статей VIII Международной молодежной научной конференции*. 2021. С. 307—314.
14. Henke B., Gullikson E., Davis J. X-ray interactions: Photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\text{--}30,000\text{ eV}$, $Z = 1\text{--}92$ // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1993. V. 54. Iss. 2. P. 181—342.
15. Кишин И.А., Кубанкин А.С., Кубанкина А.А., Нажмудинов Р.М., Дроник В.И., Козаченко А.О. Патент № 2022613325. Программа управления установкой для диагностики толщины пластиковых и углеродных труб. № 2022612782. Заявл. 02.03.2022. Опубл. 14.03.2022. 1 с.
16. Amptek, OEM Solutions for XRF Systems. URL: <http://www.amptek.com/products/x-ray-detectors/oem-xrf-solutions/oem-solutions-for-xrf-systems> (дата обращения: 13.06.2023).
17. Алексеев В.И., Астапенко В.А., Елисеев А.Н., Иррибарра Э.Ф., Карнов В.А., Кишин И.А., Кротов Ю.А., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Аль-Омари М., Сахно С.В. Исследование механизмов генерации рентгеновского излучения при взаимодействии релятивистских электронов с веществом на установке «Рентген 1» // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2017. № 7. С. 13—18.
18. Nazhmudinov R.M., Shchagin A.V., Kishin I.A., Kubanin A.S., Trofymenko S.V., Potylitsyn A.P., Gogolev A.S., Filatov N.A., Kube G., Potylitsina-Kube N.A., Stanitzki M., Novokshonov A. K-shell ionization cross section of Ti and Cu atoms by 1 and 2 GeV electrons // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2021. V. 54. No. 4. P. 045201.
19. Oxford Instruments. Jupiter 5000 Series Radiation Shielded X-ray Tube. URL: <https://xray.oxinst.com/x-ray-tube-products/x-ray-tube-assembly-radiation-shielded/jupiter-5000-series> (дата обращения: 13.06.2023).
20. Кишин И.А., Кубанкин А.С., Кубанкина А.А., Фирсов Д.Г. НОУ-ХАУ № 426. Способ контроля качества конструкционных материалов, изготовленных из легких элементов. Заявл. 02.06.2022. Опубл. 29.06.2022. 1 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

© 2023 г. М.Ю. Федотов^{1, 2,*}

¹Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия 630090 Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 1

²Российская инженерная академия, Россия 125009 Москва, Газетный пер., 9, стр. 4
E-mail: *fedotovmyu@gmail.com

Поступила в редакцию 25.07.2023; после доработки 01.09.2023
Принята к публикации 04.09.2023

Рассмотрены преимущества и недостатки существующих методов термокомпенсации данных от волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брэгговских решеток в составе встроенной системы одновременного контроля деформации и температуры полимерных композитных материалов. Показано, что при невозможности внешнего контроля температуры наиболее целесообразно реализация метода двух оптических волокон, обладающих различной чувствительностью хотя бы к одному из этих параметров за счет различных легирующих добавок. Рассмотрены технологические вопросы, связанные с формированием пространственной топологии и обеспечением эффективного опроса встроенной оптической системы контроля полимерных композитных материалов методом двух волокон. Приведены результаты теоретических исследований линейной модели термокомпенсации, модели, учитывающей влияние перекрестной чувствительности, а также квадратичной модели термокомпенсации данных оптического контроля. Установлено, что линейная модель является наиболее простой, однако при ее применении стоит учитывать погрешность, связанную с неточностью аппроксимации данных оптического контроля линейной функцией. При этом показано, что для повышения качества и достоверности результатов оптического контроля целесообразно применять квадратичную модель термокомпенсации, обеспечивающую уровень погрешности, сопоставимый с погрешностью устройства опроса волоконно-оптических датчиков. Полученные результаты могут быть применены для разработки методик одновременного контроля образцов, а также монолитных и трехслойных конструкций из конструкционных слоистых ПКМ с предельными условиями формования (температура не более 180 °С, удельное давление не более 0,7 МПа) как в процессе стендовых и иных испытаний, так и, в перспективе, в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: конструкционный слоистый полимерный композитный материал, оптический контроль, волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, пространственная топология, линейная модель термокомпенсации, перекрестная чувствительность, квадратичная модель термокомпенсации, погрешность данных контроля.

THEORETICAL INVESTIGATIONS OF TEMPERATURE COMPENSATION OF THE RESULTS OF THE DIAGNOSIS OF POLYMER COMPOSITES BY THE METHOD OF TWO OPTICAL FIBER

© 2023 M. Yu. Fedotov^{1,2,*}

¹Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Academician
Koptug ave. 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

²All-Russian public organization «Russian Academy of Engineering»,
Gazetny lane, 9, building 4, Moscow, 125009, Russia,

The paper considers the advantages and disadvantages of existing methods for temperature compensation of data from fiber-optic sensors based on fiber Bragg gratings as part of an embedded system for simultaneous testing of deformation and temperature of polymer composite materials. It is shown that when external temperature testing is impossible, it is most expedient to implement the method of two optical fibers with different sensitivity to at least one of these parameters due to different dopants. Technological issues related to the formation of a spatial topology and the provision of an effective interrogation of the embedded optical system for monitoring polymer composite materials by the two-fiber method are considered. The results of theoretical researches of a linear model of temperature compensation, a model that takes into account the influence of cross sensitivity, as well as a quadratic model of temperature compensation of optical testing data are presented. It has been established that the linear model is the simplest, however, when using it, one should take into account the error associated with the inaccuracy of the approximation of optical inspection data by a linear function. At the same time, it is shown that in order to improve the quality and reliability of the results of optical testing, it is advisable to use a quadratic model of

temperature compensation, which provides an error level comparable to the error of the fiber-optic sensor interrogator. The results obtained can be used to develop methods for the simultaneous testing of samples, as well as monolithic and three-layer structures from structural layered of polymer composite materials with limiting molding conditions (temperature not more than 180 °C, specific pressure not more than 0,7 MPa), as in the process of bench and other tests, and, in the future, in real operating conditions.

Keywords: structural layered polymeric composite material, optical testing, fiber optic sensor, fiber Bragg grating, spatial topology, linear temperature compensation model, cross sensitivity, quadratic temperature compensation model, testing data error.

DOI: 10.31857/S0130308223100056, **EDN:** WZWNDF

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение слоистых полимерных композитных материалов (ПКМ) на основе углеродных армирующих волокон для высоконагруженных и ответственных конструкций летательных аппаратов (ЛА) [1] и других изделий ракетно-космической, транспортной, строительной отраслей, а также машиностроения, судостроения, энергетики требует новых подходов к оценке технического состояния таких конструкций для обеспечения их безопасной эксплуатации [2, 3]. В этой связи одним из наиболее перспективных направлений в области неразрушающего контроля (НК) и диагностики ПКМ и конструкций является применение метода оптического НК [4, 5], позволяющего с помощью интегрированных волоконно-оптических датчиков (ВОД) [6, 7] на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [8, 9] определять действующие значения деформаций и температур в режиме реального времени, а также информировать об их превышении непосредственно при эксплуатации. Однако, как правило, контролируемые объекты работают при одновременном воздействии как механических нагрузок, так и температур, что приводит к необходимости учета температурной поправки.

При этом целый ряд работ посвящен решению вопросов, связанных с термокомпенсацией данных от ВОД для различных конструкций. Так, в работе [10] рассмотрены некоторые аспекты термокомпенсации данных от волоконных световодов (ВС) с ВБР для применения в качестве системы контроля деформаций предварительно напряженных бетонных конструкций. Для этих целей исследовалась конструкция типа «Smart-Strand», представляющая собой трос, состоящий из шести стальных спиральных элементов диаметром 5 мм, при этом в качестве центральной жилы использовалась жила из углепластика диаметром 5,3 мм, в которую был интегрирован ВС с ВБР с ЗП диаметром 5,3 мм. Исследования по термокомпенсации данных от ВБР проводились на бетонных образцах в диапазоне температур от –15 до 55 °C. Для проведения контроля применялась известная линейная модель оптического контроля, приведены известные основные соотношения. В статье [11] предложена конструкция ВОД для одновременного измерения деформации и температуры для применения в системах контроля повреждений объектов морской, авиационно-космической отраслей и гражданского строительства, где не требуется высокая точность измерений. В частности, диапазон измеряемых температур составляет 50—180 °C, деформаций — 1100 мкм/м. В [12] рассмотрены практические аспекты применения ВОД на основе ВБР, имеющих различное конструктивное исполнение, для мониторинга состояния конструкций за счет установки на поверхность исследуемых объектов с помощью клеевого соединения. В работе [13] приведены основные расчетные соотношения и рассмотрен метод термокомпенсации с использованием поверхностно закрепляемых ВОД на основе ВБР для мониторинга металлических конструкций с различными КЛТР. Анализируя данные работы, стоит отметить, что в них практически отсутствует описание математических моделей оптического контроля композитных конструкций, при этом приводятся лишь финальные соотношения для линейного приближения.

Целью работы является разработка и адаптация к реальным условиям математических моделей термокомпенсации данных оптического одновременного контроля деформации и температуры ПКМ интегрированными ВОД на основе ВБР методом двух оптических волокон, теоретическая оценка погрешности результатов контроля с использованием разработанных моделей.

МЕТОДЫ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ДАННЫХ ВОД В СОСТАВЕ ПКМ

Термокомпенсация может быть эффективно реализована за счет использования специализированных волоконных компонентов, которые потенциально пригодны для интегрирования в ПКМ. Среди них суперструктурированные [14], наклонные [15], чирпованные [16] с обратным профилем показателя преломления, длиннопериодные ВБР, волоконные интерференционные схемы на основе

интерферометра Маха-Цандера, многомодовой интерференции, с использованием волокон с различным диаметром, микроструктурированные волокна [17], с использованием лазерного резонатора эрбиевого лазера, микро- и нановолокна, ВОД на основе поляризационно-зависимых потерь, с использованием двух ВБР, расположенных на большом спектральном расстоянии друг от друга. Все перечисленные выше способы имеют несколько существенных недостатков в плане практического использования и, в частности, при интегрировании в ПКМ, либо не соответствуют техническим требованиям коммерчески доступного оптического оборудования (ОУ). Во-первых, это наличие побочных максимумов в спектре отражения таких ВОД, что затрудняет расположение большого количества ВОД на основе ВБР на одном ВС и может значительно усложнить конструкцию оптической линии квазираспределенной системы ВОД в составе ПКМ. Второй существенный недостаток связан с хрупкостью конструкции самих ВОД, что обусловлено способом их изготовления и принципом функционирования. В-третьих, существует недостаток, который связан с очень большой областью спектра, требуемой для работы ВОД (до 300 нм). В-четвертых, для работы ВОД требуется ОУ с очень высоким спектральным разрешением, например, (1—5) пм, что на практике ниже спектрального разрешения коммерчески доступных ОУ. Каждый из этих недостатков, не дает практической возможности выполнения термокомпенсации ВОД в составе ПКМ и конструкций. Фактически, единственным методом, который на данный момент является физически реализуемым, технологичным и относительно простым, является метод двух волокон, в рамках которого существует возможность либо устранить полностью, либо значительно ослабить эти недостатки. Например, ВОД на основе однородных ВБР, сформированные в ВС, имеют узкий спектральный контур (до 1 нм) и незначительные побочные максимумы, что избавляет от первого недостатка. На данный момент существуют методы формирования/записи ВБР в ВС без снятия защитного покрытия (ЗП) — поточечная фемтосекундная запись, таким образом можно избежать второго недостатка, связанного с хрупкостью конструкции ВОД при интегрировании его в ПКМ. Третий недостаток отсутствует, так как в сравнительно небольшом спектральном интервале 70 нм может быть размещено до нескольких десятков ВОД, записанных в одном ВС для создания квазираспределенной системы ВОД. Коммерчески доступные ОУ с разрешением около 10 пм пригодны для оптического НК этим методом, таким образом устраняется и четвертый недостаток.

Стоит подчеркнуть, что метод двух волокон применим, когда нет возможности использовать дополнительный ВОД, измеряющий независимо либо температуру, либо деформацию. Если же есть возможность использовать, например, внешний измеритель температуры, то достаточно только одного ВС с ВОД для определения деформации ПКМ и конструкций.

Таким образом, предложен новый метод одновременного контроля деформации и температуры конструкций из слоистых углепластиков, имеющих различную схему армирования, с помощью интегрированных в структуру материала на этапе сборки пакета препрега (для автоклавного формования) либо слоев армирующего наполнителя (для формования методом вакуумной инфузии) точечных ВОД на основе ВБР, имеющих различную деформационную и/или температурную чувствительность. Подход, в целом, известен в линейной постановке, однако информация довольно разрозненная. При этом для контроля композитных конструкций с использованием квадратичной модели оптического контроля, учитывающей дополнительно перекрестную чувствительность, такой подход до сих пор не применялся.

В данной работе приведено обобщение моделей термокомпенсации данных от ВОД на основе ВБР в составе ПКМ для случаев:

- линейного приближения;
- приближения, учитывающего перекрестную чувствительность;
- квадратичного приближения.

Для все описанных моделей приведена оценка влияния погрешности определения измеряемых параметров — деформации и температуры.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПКМ МЕТОДОМ ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Формирование пространственной топологии и выбор метода опроса ВОД

Говоря о реализации процесса термокомпенсации данных оптического НК от квазираспределенных ВОД на основе ВБР методом двух волокон, стоит отметить, что существенным фактором, напрямую влияющим на качество и достоверность данных контроля такой системы, является реализация пространственной топологии ВОД в составе ПКМ.

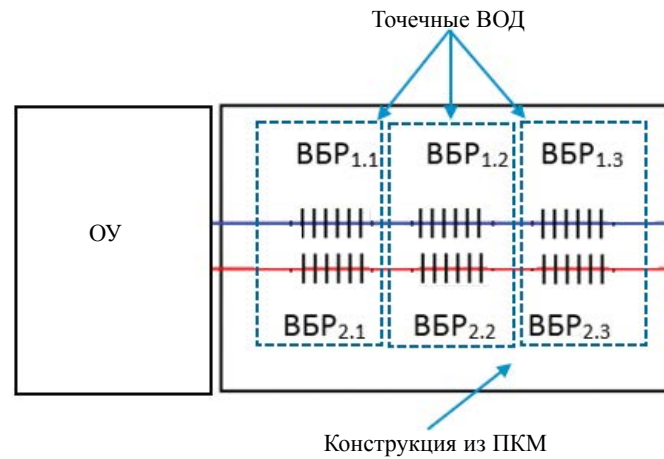


Рис. 1. Последовательная пространственная топология ВОД.

На основании результатов экспериментальных исследований [18], где была предложена и обоснована последовательная топология точечных ВОД на основе ВБР в составе квазираспределенной системы (рис. 1), в качестве метода опроса с учетом особенностей коммерчески доступных ОУ был выбран метод спектрального разделения каналов (СРК) [19] (рис. 2).

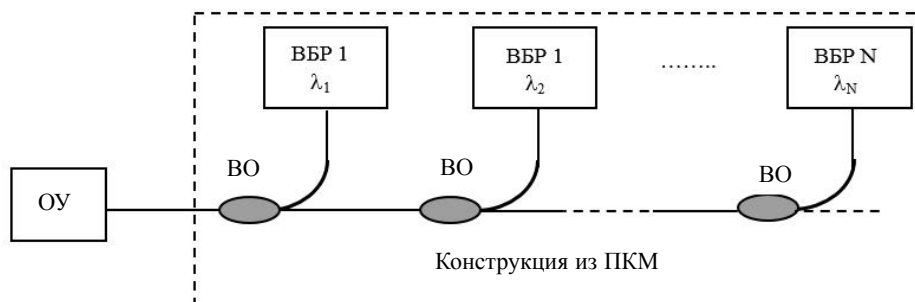


Рис. 2. Метод СРК для опроса ВОД: ВО — волоконный ответвитель.

Линейная модель термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ с помощью ВОД на основе ВБР

Основы термокомпенсации методом двух волокон были рассмотрены в [20]. Так, метод основан на решении системы уравнений, составленной на базе измеренных при калибровке параметров для близко расположенных двух ВБР, сформированных на ВС, обладающих существенно различной чувствительностью к деформации и температуре, либо к одному из этих параметров за счет различных легирующих добавок, например, Ge, P, Sb и др. [21]. Данный метод (линейная модель) применим в предположении о неизменности параметров чувствительностей при различных температурах и деформациях, т.е. в пренебрежении перекрестных чувствительностей, характеризующих влияние температуры на чувствительность к деформации и наоборот. Тогда справедлива система уравнений вида:

$$\begin{cases} b_1 = K_{T1}T + K_{\varepsilon1}\varepsilon \\ b_2 = K_{T2}T + K_{\varepsilon2}\varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

где $b_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_{01}}$, $b_2 = \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{02}}$ — относительные смещения резонансных длин волн ВБР λ_{01} , λ_{02} , нм вследствие изменения относительной деформации ε , мкм/м и/или температуры T , °C; $\Delta\lambda_1$,

$\Delta\lambda_2$ — абсолютные смещения резонансных длин волн ВБР $\lambda_{01}, \lambda_{02}$, нм; K_{T1}, K_{T2} — линейные коэффициенты чувствительности ВБР к температуре для разнотемпературных ВС, $(^\circ\text{C})^{-1}$; $K_{\varepsilon1}, K_{\varepsilon2}$ — линейные коэффициенты чувствительности ВБР к деформации для разнотемпературных ВС, $(\text{мкм/м})^{-1}$.

Решение (1) выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} T = \frac{b_1 K_{\varepsilon2} - b_2 K_{\varepsilon1}}{K_{\varepsilon2} K_{T1} - K_{\varepsilon1} K_{T2}} \\ \varepsilon = \frac{b_1 - K_{T1} T}{K_{\varepsilon1}} = \frac{b_2 K_{T1} - b_1 K_{T2}}{K_{\varepsilon2} K_{T1} - K_{\varepsilon1} K_{T2}} \end{cases} \quad (2)$$

Как следует из (2), для определения температуры и деформации надо измерить следующие параметры ВБР: $K_{T1}, K_{T2}, K_{\varepsilon1}, K_{\varepsilon2}$, а также b_1, b_2 .

Для определения параметров применяется аппроксимация функции двух переменных $b(T, \varepsilon)$ по методу наименьших квадратов (МНК) двумерным линейным полиномом, т.е. необходимо проведение измерений при различных температурах и деформациях зависимостей смещения резонансной длины волны ВБР, что сводится к измерению смещения длины волны на сетке значений:

$$b_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, N_{ij} \quad (3)$$

и определению по этой сетке всех коэффициентов по МНК. Здесь b_{ij} — экспериментально измеренные значения при наборе температур $\{T_1, T_2, \dots, T_{N_i}\}$ и деформаций $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{N_j}\}$. Заметим, что наборы температур и деформаций могут содержать члены неупорядоченные по их величине, так как это не имеет значения для метода МНК. Иными словами, изменение температур или деформаций, для определения соответствующих им b_{ij} , могут проводиться в любом направлении, либо даже выбираться хаотически. Для нахождения коэффициентов надо решить линейную систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов K_T, K_ε :

$$\begin{cases} K_T N_j \sum_{i=1}^{N_i} T_i^2 + K_\varepsilon \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i b_{i,j} \\ K_T \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j + K_\varepsilon N_i \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j b_{i,j} \end{cases} \quad (4)$$

Решение (4) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \bar{K}_T = \frac{c_2 d_1 - c_3 d_2}{c_1 c_2 - c_3^2} \\ \bar{K}_\varepsilon = \frac{-c_3 d_1 + c_1 d_2}{c_1 c_2 - c_3^2} \end{cases} \quad (5)$$

где соответствующие коэффициенты определяются выражениями:

$$\begin{aligned} c_1 &= N_j \sum_{i=1}^{N_i} T_i^2, & c_2 &= N_i \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j^2, & c_3 &= \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 \varepsilon_j^2, \\ d_1 &= \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} b_{i,j} T_i, & d_2 &= \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j b_{i,j}. \end{aligned} \quad (6)$$

Стоит отметить, что для определения параметров в (1) можно также воспользоваться стандартными процедурами аппроксимации МНК из пакетов MATLAB (fit) или Python (scipy.optimize.leastsq) [22]. Конечно, эти процедуры работают значительно медленнее выражений (4—6), однако поскольку процесс калибровки выполняется однократно, то данный недостаток является несущественным. К достоинствам использования стандартных методов можно отнести их существенно более легкое использование на более сложных аппроксимационных полиномах, когда число перекрестных слагаемых значительно возрастает, что хорошо видно из выражения вида:

$$b(T, \varepsilon) = B(T, \varepsilon) - B(0, 0) = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^{N-n} K_{n,k} \varepsilon^k T^n + O(T + \varepsilon)^{N+1}, \quad (7)$$

где $K_{n,k} = B^{(n,k)}(0,0)/k!n!$; $B^{(n,k)}$ — частные производные функции $B(T, \varepsilon)$ в точке $(0,0)$, эквивалентные коэффициентам чувствительности K ; $O(T + \varepsilon)^{N+1}$ — остаточный член при разложении функции $B(T, \varepsilon)$ в ряд Тейлора до $N+1$ порядка малости.

В качестве примера приведем поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации по описанной линейной модели термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ и конструкций интегрированными ВБР (рис. 3).

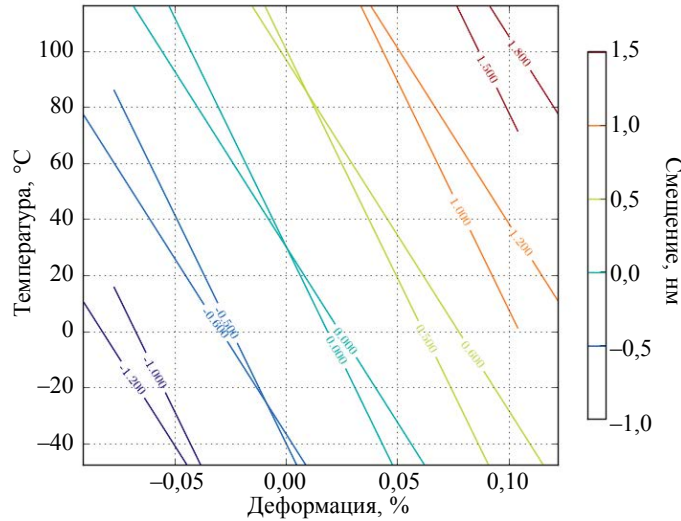


Рис. 3. Поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации в линейном приближении.

Здесь линиям с различным наклоном соответствуют ВБР, записанные в ВС с различным легированием. Соответствующее смещение резонансных длин волн ВБР подписано вдоль каждой линии.

Обращаясь к теории ошибок [23], а также к результатам теоретических исследований по оценке погрешностей встроенной в ПКМ волоконно-оптической системы контроля на основе ВОД [24], оценим погрешность определения деформации и температуры с использованием линейной модели термокомпенсации:

$$\begin{cases} \delta T = \pm \frac{\left(\overline{K_{\varepsilon 2}}^2 \delta b_1^2 + \overline{K_{\varepsilon 1}}^2 \delta b_2^2 \right)^{1/2}}{\overline{K_{\varepsilon 2}} \overline{K_{T1}} - \overline{K_{\varepsilon 1}} \overline{K_{T2}}} \\ \delta \varepsilon = \pm \frac{\left(\overline{K_{T2}}^2 \delta b_1^2 + \overline{K_{T1}}^2 \delta b_2^2 \right)^{1/2}}{\overline{K_{\varepsilon 2}} \overline{K_{T1}} - \overline{K_{\varepsilon 1}} \overline{K_{T2}}} \end{cases} \quad (8)$$

где $\delta b_{1,2}$ означает абсолютную погрешность определения относительных смещений резонансных длин волн ВБР; верхнее подчеркивание соответствующих коэффициентов чувствительности означает, что используются их средневзвешенные величины, при этом $\delta b_{1,2}$ определяется выражением:

$$\delta b_{1,2} = \left(\delta b_{\text{МНК}1,2}^2 + \delta b_{\text{ПР}1,2}^2 \right)^{1/2}, \quad (9)$$

где $\delta b_{\text{ПР}1,2}$ — погрешность ОУ, которая может быть выбрана одинаковой для обеих ВБР, $\delta b_{\text{МНК}1,2}$ находится из эксперимента методом МНК как среднее квадратическое отклонение (СКО) относительного смещения резонансной длины волны ВБР, т.е. оценочные погрешности при калибровке каждой из двух ВБР определяются по формуле:

$$\delta b_{\text{МНК}1,2} = \left[\frac{1}{N_i N_j} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \left(b_{i,j} - b(\overline{K_T}, \overline{K_\varepsilon}, T_i, \varepsilon_j) \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Модель термокомпенсации, учитывающая перекрестную чувствительность ВОД на основе ВБР в составе оптической системы контроля ПКМ

Если при изменении температуры и/или деформации соответствующие коэффициенты чувствительности к деформации и/или температуре будут значительно изменяться, то для уменьшения общей погрешности и повышения достоверности данных оптического контроля ПКМ и конструкций необходимо учитывать перекрестные коэффициенты чувствительности ВБР для обоих ВС, реализующих возможность термокомпенсации по методу двух волокон. В этом случае система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} b_1 = K_{T1}T + K_{\varepsilon1}\varepsilon + K_{C1}T\varepsilon \\ b_2 = K_{T2}T + K_{\varepsilon2}\varepsilon + K_{C2}T\varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

В итоге, решение (11) сводится к определению корней квадратного уравнения относительно ε и T . При этом целесообразно остановиться на одном физически обоснованном решении:

$$\begin{cases} T = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4c_0c_2}}{2c_2} \\ \varepsilon = \frac{b_1 - K_{T1}T}{K_{\varepsilon1} + K_{C1}T} \end{cases}, \quad (12)$$

где соответствующие коэффициенты определяются выражениями:

$$\begin{aligned} c_0 &= b_1K_{\varepsilon2} - b_2K_{\varepsilon1}, \\ c_1 &= (K_{\varepsilon1}K_{T2} - K_{\varepsilon2}K_{T1}) + (b_1K_{C2} - b_2K_{C1}), \\ c_2 &= K_{T2}K_{C1} - K_{T1}K_{C2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Нетрудно проверить, что (12) с учетом (13) переходят в (2) при $K_{C1,2} \rightarrow 0$. Таким образом, для реализации системы оптического контроля ПКМ и конструкций этим способом нужно знать большее количество параметров: помимо K_{T1} , K_{T2} , $K_{\varepsilon1}$, $K_{\varepsilon2}$, b_1 , b_2 нужно еще определять K_{C1} , K_{C2} .

Вопрос определения искомых параметров также сводится к применению аппроксимации с помощью МНК функции двух переменных $b(T, \varepsilon)$ (11) двумерным полиномом, т.е. к проведению оптического контроля ПКМ и конструкций путем определения зависимостей смещения резонансной длины волны ВБР при различных температурах и деформациях, что сводится, фактически, к измерению смещения резонансной длины волны ВБР на сетке значений (3) и определению по этой сетке всех коэффициентов чувствительности методом МНК. Для нахождения значений коэффициентов чувствительности нужно решить линейную систему уравнений вида:

$$\begin{cases} K_T N_j \sum_{i=1}^{N_i} T_i^2 + K_\varepsilon \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j + K_C \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 \varepsilon_j = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i b_{i,j} \\ K_T \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j + K_\varepsilon N_i \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j^2 + K_C \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \varepsilon_j b_{i,j} \\ K_T \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 \varepsilon_j + K_\varepsilon \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j^2 + K_C \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 \varepsilon_j^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \varepsilon_j b_{i,j} \end{cases} \quad (14)$$

Решение системы уравнений (14) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \overline{K_T} = \frac{c_2c_3d_1 - c_6^2d_1 - c_3c_4d_2 + c_5c_6d_2 - c_2c_5d_3 + c_4c_6d_3}{D} \\ \overline{K_\varepsilon} = \frac{-c_3c_4d_1 + c_5c_6d_1 + c_1c_3d_2 - c_5^2d_2 + c_4c_5d_3 - c_1c_6d_3}{D} \\ \overline{K_C} = \frac{-c_2c_5d_1 + c_4c_6d_1 + c_4c_5d_2 - c_1c_6d_2 + c_1c_2d_3 - c_4^2d_3}{D} \end{cases} \quad (15)$$

где дискриминант D и соответствующие коэффициенты определяются как

$$D = c_1 c_2 c_3 - c_3 c_4^2 - c_2 c_5^2 + 2c_4 c_5 c_6 - c_1 c_6^2. \quad (16)$$

В качестве примера приведем поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации по описанной модели термокомпенсации, учитывающей перекрестную чувствительность данных оптического контроля ПКМ и конструкций ВОД на основе ВБР (рис. 4).

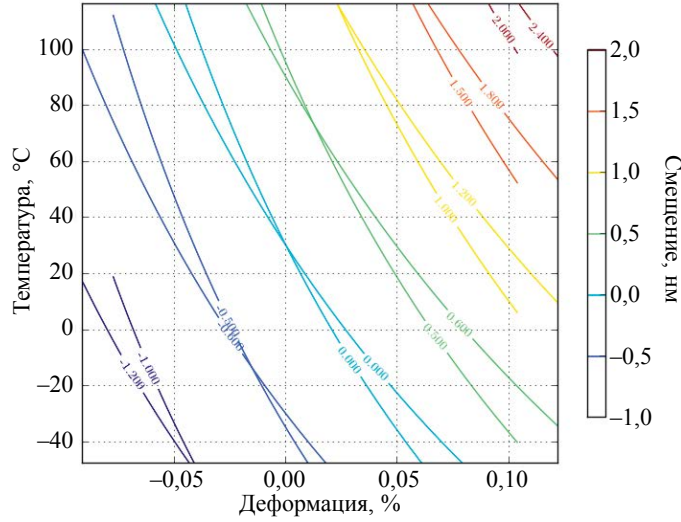


Рис. 4. Поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации с учетом перекрестной чувствительности.

Из рис. 4 видно, что появление перекрестного слагаемого привело к существенной изогнутости изолиний. Однако, благодаря отличающимся наклонам кривых во всей области параметров, метод термокомпенсации, основанный на использовании двух различных волокон, остается применимым и в этом случае.

По аналогии с линейной моделью оценим погрешность определения деформации и температуры с использованием модели термокомпенсации, учитывающей перекрестную чувствительность:

$$\begin{cases} \delta T = \pm [T_{b_1}'^2 \delta b_1^2 + T_{b_2}'^2 \delta b_2^2] \\ \delta \varepsilon = \pm \left[\left(\frac{1}{TK_{C1} + K_{\varepsilon 1}} + \frac{(-b_1 K_{C1} - K_{T1} K_{\varepsilon 1}) T_{b_1}'}{(TK_{C1} + K_{\varepsilon 1})^2} \right)^2 \delta b_1^2 + \frac{(-b_1 K_{C1} + K_{T1} K_{\varepsilon 1})^2 T_{b_2}'^2}{(TK_{C1} + K_{\varepsilon 1})^4} \delta b_2^2 \right]^{1/2}, \end{cases} \quad (17)$$

где $\delta b_{1,2}$ определяется выражением (9) с учетом (10), а $T_{b_{1,2}}'$ — частные производные температуры T по параметрам $b_{1,2}$:

$$\begin{cases} T_{b_1}' = \frac{1}{2c_2} \left(-K_{C2} + \frac{2c_1 K_{C2} - 4c_2 K_{\varepsilon 2}}{2\sqrt{c_1^2 - 4c_0 c_2}} \right) \\ T_{b_2}' = \frac{1}{2c_2} \left(K_{C1} + \frac{-2c_1 K_{C1} + 4c_2 K_{\varepsilon 1}}{2\sqrt{c_1^2 - 4c_0 c_2}} \right), \end{cases} \quad (18)$$

где T и коэффициенты c_0, c_1, c_2 определяются формулой (13).

Формулы (17) имеют достаточно сложный вид и при повышении степени полинома они усложняются еще больше, это нужно учитывать при построении эффективной системы одновременного оптического контроля деформации и температуры ПКМ и конструкций.

Квадратичная модель термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ с помощью ВОД на основе ВБР

Как следует из [24], температурные и деформационные зависимости гораздо точнее могут быть описаны квадратичной зависимостью, нежели линейной, поэтому оправдано рассмотрение квадратичного полинома аппроксимации для описания двумерного поведения смещения резонансной длины волны ВБР в составе ПКМ.

Система уравнений (11), учитывающая перекрестные коэффициенты чувствительности, является неполной в смысле разложения двумерной функции до второго порядка малости аргументов. Из формулы (7) следует, что для учета всех членов второго порядка малости надо решать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} b_1 = K_{1T1}T + K_{1\epsilon1}\epsilon + K_{C1}T\epsilon + K_{2T1}T^2 + K_{2\epsilon1}\epsilon^2 \\ b_2 = K_{1T2}T + K_{1\epsilon2}\epsilon + K_{C2}T\epsilon + K_{2T2}T^2 + K_{2\epsilon2}\epsilon^2 \end{cases} \quad (19)$$

Аналитическое решение (19) имеет очень сложный вид, поэтому наиболее целесообразно обратиться к численным методам.

Определение параметров K_{1T} , $K_{1\epsilon}$, K_C , K_{2T} , $K_{2\epsilon}$ по аналогии с рассмотренными выше моделями термокомпенсации, сводится к применению аппроксимации двумерным полиномом функции двух переменных $b(T, \epsilon)$ из (19) с помощью МНК, т.е. к проведению оптического контроля ПКМ и конструкций путем определения зависимостей смещения резонансной длины волны ВБР при различных температурах и деформациях, действующих одновременно, что аналогично сводится к определению по сетке (3) всех значений коэффициентов чувствительности методом МНК. Так, для нахождения соответствующих коэффициентов надо решить линейную систему уравнений пятого порядка:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \epsilon_j (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i \epsilon_j (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \epsilon_j^2 (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} T_i^2 (K_T T_i + K_{2T} T_i^2 + K_\epsilon \epsilon_j + K_C T_i \epsilon_j + K_{2\epsilon} \epsilon_j^2 - b_{i,j}) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

Решение системы уравнений (20) является довольно сложным и громоздким, поэтому приводить его в символьном виде не будем, его можно найти, используя стандартные методы численного поиска решения систем уравнений, например, на языке Python функция `numpy.linalg.solve` [22].

В качестве примера приведем поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации по описанной квадратичной модели термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ и конструкций ВОД на основе ВБР, учитывающей все члены второго порядка разложения (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что взаимный наклон линий не является постоянным, что может сказаться на точности термокомпенсации. При анализе результатов калибровки реального образца из ПКМ этот момент должен быть учтен.

Оценим погрешность определения деформации и температуры с использованием квадратичной модели термокомпенсации:

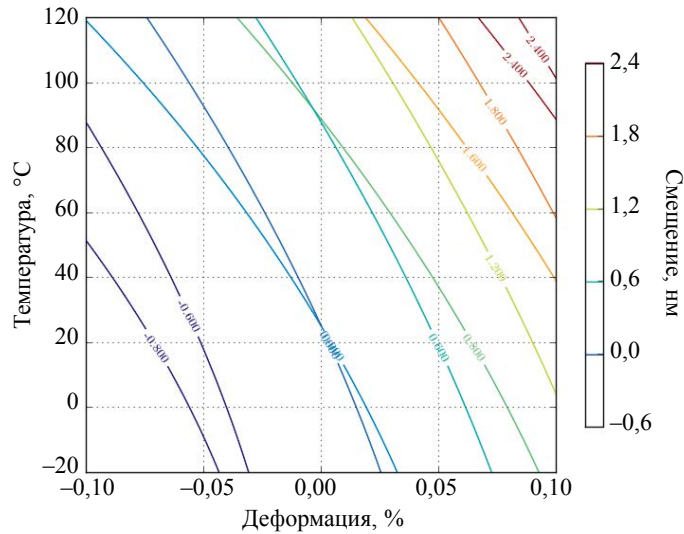


Рис. 5. Поле смещений резонансных длин волн ВБР при одновременном изменении температуры и деформации с учетом квадратичной модели термокомпенсации.

$$\begin{cases} \delta T = \pm \frac{\left[\left(\bar{K}_{1\epsilon 2} + \bar{K}_{C2}T + 2\bar{K}_{2\epsilon 2}\epsilon \right)^2 \delta b_1^2 + \left(\bar{K}_{1\epsilon 1} + \bar{K}_{C1}T + 2\bar{K}_{2\epsilon 1}\epsilon \right)^2 \delta b_2^2 \right]^{1/2}}{I} \\ \delta \epsilon = \pm \frac{\left[\left(\bar{K}_{1T 2} + \bar{K}_{C2}\epsilon + 2\bar{K}_{2T 2}T \right)^2 \delta b_1^2 + \left(\bar{K}_{1T 1} + \bar{K}_{C1}\epsilon + 2\bar{K}_{2T 1}T \right)^2 \delta b_2^2 \right]^{1/2}}{I} \end{cases} \quad (21)$$

где параметр I определяется выражением:

$$I = \left(\bar{K}_{1T 1} + \bar{K}_{C1}\epsilon + 2\bar{K}_{2T 1}T \right) \left(\bar{K}_{1\epsilon 2} + \bar{K}_{C2}T + 2\bar{K}_{2\epsilon 2}\epsilon \right) - \left(\bar{K}_{1T 2} + \bar{K}_{C2}\epsilon + 2\bar{K}_{2T 2}T \right) \left(\bar{K}_{1\epsilon 1} + \bar{K}_{C1}T + 2\bar{K}_{2\epsilon 1}\epsilon \right). \quad (22)$$

Из (21) с учетом (22) видно, что погрешность зависит от величины деформации и температуры. В случае, если $\bar{K}_{C1,2} = \bar{K}_{2\epsilon 1,2} = \bar{K}_{2T 1,2} = 0$ выражение (21) сводится к (8).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕТОДА ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ВЕЛИЧИНУ ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПКМ

Очевидно, что на результирующую точность определения деформации ПКМ и конструкций методом оптического контроля с использованием интегрированных ВОД на основе ВБР влияют два фактора. Первое, это погрешность определения резонансных длин волн ВБР, которая определяется параметрами используемого ОУ. Влияние этой погрешности было подробно исследовано ранее [20]. Второе, это погрешность калибровки, в которую входят как неточности при аппроксимации полученного массива данных методом МНК (вызванные отклонением реальных зависимостей от используемых для аппроксимации), так и погрешности определения соответствующих параметров во время процедуры калибровки. Для получения системы, отвечающей заданным параметрам и имеющей максимальную производительность, погрешность, вносимая ОУ, и погрешность калибровки должны быть одного порядка.

Оценка влияния неточности аппроксимации в линейном приближении

Для исследования влияния различных вкладов погрешности калибровки на результирующую величину измеряемой деформации рассмотрим поле смещений резонансной длины волны на двух модельных ВБР, описываемых общей формулой (7) с учетом второго порядка разложения, построенное в следующих диапазонах: температура — от -70 до 120 °C, относительная деформация от

Таблица 1

Коэффициенты чувствительностей ВБР для второго порядка разложения

№ ВБР	λ_0 , нм	K_T , пм/°С	K_ϵ , пм/(мкм/м)	K_C , пм/(°С· мкм/м)	K_{2T} , пм/°С ²	$K_{2\epsilon}$, пм/(мкм/м) ²
ВБР1	1550,0	9,0	1,11	0,0002	0,01	0,00002
ВБР2	1550,0	13,0	1,11	0,0002	0,01	0,00002

–2000 до 2000 мкм/м (от –0,2 до 0,2 %). Коэффициенты, выбранные для расчета смещений, приведены в табл. 1.

Далее проведем оценку погрешности оптического контроля ПКМ и конструкций с помощью интегрированных ВОД на основе ВБР, возникающей в результате неточности аппроксимации, а также в процессе калибровки.

Очевидно, что линейная аппроксимация для метода двух волокон является наиболее предпочтительной ввиду простоты вычисления деформации и термокомпенсации. Вычисление погрешности определяемой относительной деформации проведем согласно (8). Значение $\delta b_{1,2}$ погрешности ОУ примем равным 10 пм для обеих ВБР (справедливо, например, для универсального регистрирующего модуля (УРМ) на основе спектрометра Ibsen I-MON 512 E) при резонансной длине волны ВБР $\lambda_0 = 1550$ нм.

Для рассматриваемого массива данных с учетом формул (9) и (10) получим значение абсолютной погрешности определения относительного смещения резонансных длин волн ВБР $\delta b_{1,2} = 73$ пм ($\delta b_{\text{МК1,2}} = 72$ пм). Подставляя полученное значение $\delta b_{1,2}$ в (8), с учетом оптических свойств выбранной пары ВС с ВБР, получим, что неточность аппроксимации в линейном приближении приводит к погрешности определения относительной деформации ПКМ и конструкций ± 260 мкм/м, что с учетом выбранных диапазонов изменения деформации и температуры составляет 13,0 %.

Оценка влияния погрешности определения параметров калибровки в линейном приближении

В предыдущем подразделе показано, что в линейном приближении неточность аппроксимации дает существенную погрешность определения резонансной длины волны ВБР ± 260 мкм/м. Эта цифра получена в предположении, что температура и деформация в процессе калибровки были определены точно. Сделаем случайную добавку в $\pm 0,2$ °С для температуры и $\pm 0,005$ % для деформации. Проведя аналогичную процедуру, получим, что абсолютная погрешность определения относительного смещения резонансных длин волн ВБР составила $\delta b_{1,2} = 75$ пм ($\delta b_{\text{МК1,2}} = 74$ пм), что в пересчете на погрешность определения относительной деформации ПКМ и конструкций составляет ± 267 мкм/м или 13,4 % с учетом диапазонов изменения деформации и температуры. Это означает, что вклад погрешности, вносимой при калибровке, на порядок меньше погрешности, возникающей вследствие неточности линейного приближения.

Оценка влияния погрешности определения параметров калибровки с учетом квадратичной модели термокомпенсации

Проведем аналогичную оценку с учетом применения квадратичной модели термокомпенсации в указанных диапазонах изменения деформации и температуры с аналогичными случайными добавками $\pm 0,2$ °С по температуре и $\pm 0,005$ % по деформации. Абсолютная погрешность определения относительного смещения резонансных длин волн ВБР в этом случае составила $\delta b_{1,2} \approx 16$ пм ($\delta b_{\text{МК1,2}} = 16$ пм), что сопоставимо с погрешностью ОУ.

На рис. 6 приведем зависимости погрешности определения параметров калибровки при одновременном изменении температуры и деформации, полученное по квадратичной модели термокомпенсации данных оптического контроля ПКМ и конструкций с помощью формул (21), (22).

Анализируя полученные результаты, стоит отметить, что в случае учета второго порядка малости величина погрешности определения деформации становится зависимой от абсолютных значений температуры и деформации, а вид зависимости определяется вкладом нелинейных коэффициентов.

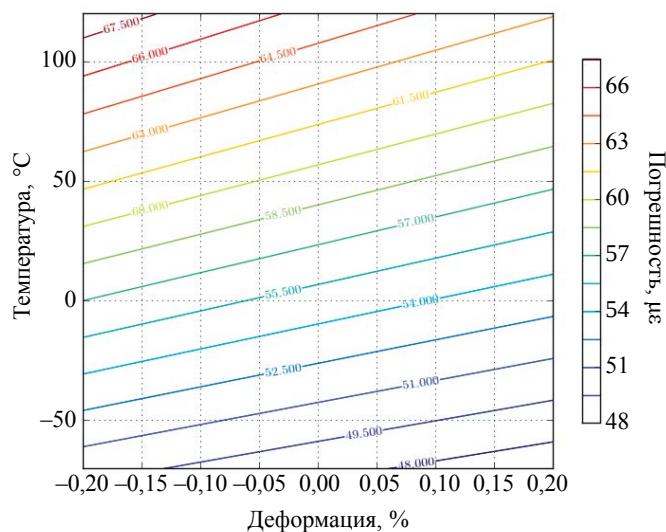


Рис. 6. Погрешность определения деформации ПКМ и конструкций по методу двух волокон с учетом квадратичной модели термокомпенсации.

ВЫВОДЫ

По результатам теоретических исследований установлено, что для одновременного контроля деформации и температуры конструкционных слоистых ПКМ, а также монолитных и трехслойных конструкций, изготавливаемых методами автоклавного и безавтоклавного формования при температурах не более 180 °С и удельных давлениях до 0,7 МПа (для монолитных конструкций) либо до 0,2 МПа (для трехслойных конструкций), интегрированными ВОД на основе ВБР, может эффективно применяться метод двух оптических волокон, который, с одной стороны, является относительно простым и технологичным, с другой стороны, имеет свои особенности с точки зрения обработки и интерпретации данных контроля. Описаны линейные, в том числе с учетом перекрестной чувствительности ВБР, и квадратичная модели термокомпенсации. Установлено, что применение квадратичной модели термокомпенсации позволяет снизить погрешность данных одновременного оптического контроля деформации на порядок в сравнении с линейной моделью термокомпенсации и получить результаты с погрешностью, сопоставимой с погрешностью ОУ. Описанные модели можно эффективно использовать на практике для разработки методик одновременного контроля образцов, а также монолитных и трехслойных конструкций из указанных конструкционных слоистых ПКМ как в процессе стендовых и иных испытаний, так и, в перспективе, в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 122—144. DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144
2. Liu Guozeng, Gao Weicheng, Liu Tao. Debonds and Water-Filled Defects Detection in Honeycomb Sandwich Composites Based on Pulse Infrared Thermography NDT Technique // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023. V. 59. No. 5. P. 583—591. [Лю Г., Гао В., Лю В., Цзоу С., Сюй Ц., Лю Т. Контроль нарушений адгезии и дефектов, заполненных водой, в многослойных композитах с сотовым наполнителем методом импульсной инфракрасной томографии // *Дефектоскопия*. 2023. № 5. С. 45—53. DOI: 10.31857/S0130308223050056]
3. Kaledin V.O., Vyachkina E.A., Vyachkin E.S., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O. Applying Ultrasonic Thermotomography and Electric-Loading Thermography for Thermal Characterization of Small-Sized Defects in Complex-Shaped Spatial Composite Structures // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 1. P. 58—69. DOI: 10.1134/S1061830920010052
4. Goossens S., Berghmans F., Munoz K., Jiménez M., Karachalios E., Saenz-Castillo D., Geernaert T. A global assessment of barely visible impact damage for CFRP sub-components with FBG-based sensors // *Composite Structures*. 2021. V. 272. P. 1—12. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114025

5. Datta A., Augustin M.J., Gupta N., Viswamurthy S.R., Gaddikeri K.M., Sundaram R. Impact localization and severity estimation on composite structure using fiber Bragg grating sensors by least square support vector regression // *IEEE Sensors Journal*. 2019. V. 19 (12). P. 4463—4470. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2901453
6. Беловолов М.И., Беловолов М.М., Семенов С.Л., Будадин О.Н., Козельская С.О., Кутюрин Ю.Г. Разработка волоконно-оптических датчиков контроля технических характеристик и оценки работоспособности композитных узлов изделий авиационной и ракетно-космической техники (Обзор) // *Конструкции из композиционных материалов*. 2020. № 3 (159). С. 45—53.
7. Анискович В. А., Будадин О. Н., Кутюрин Ю. Г., Разин А.Ф., Шаклеин А.Ф. Мониторинг напряженно-деформированного состояния изделий из композиционных материалов с использованием волоконно-оптических датчиков // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. 2018. № 4 (104). С. 126—133.
8. Matveenko V.P., Kosheleva N.A., Serovaev G.S. Strain measurements by FBG-based sensors embedded in various materials manufactured by different technological processes // *Procedia Structural Integrity*: 4th, Virtual, Funchal, Madeira, 30 августа — 02 2021 года. V. 37. Virtual, Funchal, Madeira, 2021. P. 508—516. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.116
9. Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S. Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material // *Composite Structures*. 2020. V. 239. P. 111844. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111844
10. Jeon S.-J., Park S.Y., Kim S.T. Temperature compensation of fiber bragg grating sensors in smart strand // *Sensors*. 2022. V. 22 (9). 17 p. DOI: 10.3390/s22093282
11. Jung J., Park N., Lee B. Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single fiber Bragg grating written in an erbium:ytterbium-doped fiber // *Applied Optics*. 2000. V. 39 (7). P. 1118—1120. DOI: 10.1364/AO.39.001118
12. Kuang Y., Guo Y., Xiong L., Liu W. Packaging and Temperature Compensation of Fiber Bragg Grating for Strain Sensing: A Survey // *Photonic Sensors*. 2018. V. 8 (10). 12 p. DOI: 10.1007/s13320-018-0504-y
13. Yan W., Guo Z., Wang C., Zhang Y., Du G. Passive temperature compensation package for fiber Bragg grating // *Proc. SPIE*. 2006. V. 6150. DOI:10.1117/12.676531
14. Guan B.O., Tam H.Y., Tao X.M., Dong X.Y. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000. № 12—6. P. 675—677. DOI: 10.1109/68.849081
15. Chehura E., James S.W., Tatam R.P. Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating // *Optics communications*. 2007. V. 275 (2). P. 344—347. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.03.043
16. Frazao O., Melo M., Marques P.V.S., Santos J.L. Chirped Bragg grating fabricated in fused fibre taper for strain-temperature discrimination // *Measurement science and technology*. 2005. V. 16. P. 984—988. DOI: 10.1088/0957-0233/16/4/010
17. Sulejmani S., Sonnenfeld C., Geernaert, Berghmans F., Thienpont H., Eve S., Lammens N., Luyckx G., Voet E., Degrieck J., Urbanczyk W., Mergo P., Becker M., Bartelt H. Towards micro-structured optical fiber sensors for transverse strain sensing in smart composite materials // *Sensors*. 2011. IEEE. P. 109—112. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6127305
18. Федотов М.Ю. Особенности создания системы одновременного встроенного контроля деформации и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками // *Космические аппараты и технологии*. 2023. Т. 7. № 1 (43). С. 24—34. DOI: 10.26732/j.st.2023.1.03
19. Федотов М.Ю. Методы формирования пространственной топологии и опроса волоконно-оптических датчиков для диагностики композитных конструкций // *Контроль. Диагностика*. 2023. Т. 26. № 4 (298). С. 24—37. DOI: 10.14489/td.2023.04.pp.024-037
20. Федотов М.Ю. Теоретические исследования встроенной волоконно-оптической системы контроля деформации и температуры полимерных композитов // *Контроль. Диагностика*. 2023. Т. 26. № 5 (299). С. 14—25. DOI: 10.14489/td.2023.05.pp.014-025
21. Sivanesan P., Sirkis J.S., Murata Y., Buckley S.G. Optimal wavelength pair selection and accuracy analysis of dual fiber grating sensors for simultaneously measuring strain and temperature // *Opt. Eng.* 2002. V. 41(10). P. 2456—2463.
22. <http://www.scipy.org>
23. Аксенова Е.Н., Гасников Н.К., Калашиников Н.П. Методы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений в лабораториях физического практикума / Учебно-методическое пособие. М.: МИФИ, 2009. 24 с.
24. Федотов М.Ю. Теоретические аспекты калибровки и оценки погрешностей волоконно-оптической системы диагностики полимерных композитов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2023. № 2 (170). С. 43—51. DOI: 10.52190/2073-2562_2023_2_43

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МЕХАНИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДАМИ ФАР И ДВМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕФЕКТОСКОПА УСД-60ФР-16/128

© 2023 г. Д.А. Аджибае^{1,2,*}, М.П. Савичев^{1,2,**}, В.В. Атрощенко^{1,2,***}

¹Уфимский университет науки и технологий, Россия 450076 Уфа, ул. Заки Валиди, 32

²Головной аттестационно-сертификационный центр Республики Башкортостан,
Россия 450001 Уфа, ул. Пархоменко, 155/1

E-mail: *danno23@mail.ru; **savichevmax@mail.ru; ***91250@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.2023; после доработки 21.06.2023

Принята к публикации 27.06.2023

Разработана и апробирована методика выбора схемы сканирования и способа фокусировки при проведении механизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных швов трубопроводов толщиной до 16 мм методом фазированных антенных решеток. Разработаны критерии идентификации и интерпретации дефектов на сканах дифракционно-временного метода в виде атласа дефектов. Исследование выполнено с применением нового отечественного дефектоскопа УСД-60ФР-16/128.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, магистральные трубопроводы, сварные соединения, дефекты, фазированная антенная решетка (ФАР), дифракционно-временной метод, TOFD.

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR APPLYING PA AND TOFD METHODS FOR MECHANIZED ULTRASONIC TESTING OF WELDED JOINTS OF MAIN PIPELINES USING THE USD-60FR-16/128 FLAW DETECTOR

D.A. Ajibaye^{1,2,*}, M.P. Savichev^{1,2,**}, V.V. Atroshenko^{1,2,***}

¹Ufa university of science and technology, Zaki Validi street, 32, Ufa, 450076, Russia

²The Main attestation and certification centre of the Republic of Bashkortostan,
Parkhomenko street, 155/1, Ufa 450001, Russia

E-mail: *danno23@mail.ru; **savichevmax@mail.ru; ***91250@mail.ru

Abstract: a technique was developed and tested for selecting beam steering and focusing methods for mechanized ultrasonic testing of circumferential welds of pipelines up to 16 mm thick using phased antenna arrays. Criteria for the identification and interpretation of defects on the time-of-flight diffraction scans in the form of an atlas of defects were developed. The study was carried out using a new domestic flaw detector USD-60FR-16/128.

Keywords: ultrasonic testing, main pipelines, welded joints, defects, phased array antenna (PA), time-of-flight diffraction method, TOFD.

DOI: 10.31857/S0130308223100068, EDN: XAAACP

В нефтегазовой отрасли РФ для контроля магистральных трубопроводов активно внедряются методы ультразвукового контроля, основанные на применении цифровых средств: контроль фазированными антенными решетками (ФАР) и дифракционно-временной метод (ДВМ) [1]. Метод ДВМ также имеет зарубежную аббревиатуру «TOFD». Но с практической реализацией этих методов возникают сложности, связанные с отсутствием методик их применения. В настоящее время в действующих нормативных документах [2—5] представлено пять различных схем настройки фазированной решетки, однако нет достаточных сведений об эффективности выявления сварочных дефектов разного типа каждой из настроек.

Целью работы является разработка методических рекомендации по выбору схемы сканирования и способа фокусировки антенной решетки при проведении механизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных швов магистральных трубопроводов толщиной до 16 мм методами ФАР, а также разработка критериев идентификации и интерпретации дефектов на сканах ДВМ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Изготовлены контрольные сварные соединения (КСС) со всеми типами характерных дефектов сварных швов магистральных трубопроводов (рис. 1).

2. По результатам цифровой радиографии и ручного ультразвукового контроля составлены дефектограммы на каждый КСС и приняты в качестве эталонных при дальнейшем сопоставлении результатов контроля.

3. Произведена настройка всеми способами сканирования и фокусировки, предусмотренными нормативной документацией для ФАР (12 настроек, рис. 8) а также настройка по методу ДВМ. Описан алгоритм настройки и необходимые стандартные и настроечные образцы. Проведен контроль КСС методами ФАР и ДВМ на каждой из настроек. При этом выполнялось по 5 повторных экспериментов. Допустимая разница в амплитудах от одних и тех же дефектов не должна была превышать 2 дБ.

Эксперименты проводились на **оборудовании** УСД-60ФР-16/128 с 32-элементной ФАР, преобразователями ДВМ частотой 10 МГц и углом 60 град и ручным универсальным сканером. Также применялся ультразвуковой дефектоскоп А1212 «MASTER» и комплекс цифровой радиографии «Цифракон». В качестве исследуемых КСС применялись трубы марки К56 диаметром 426 мм и толщиной 16 мм, сваренные встык ручной дуговой сваркой плавящимся электродом.



Рис. 1. Изготовление КСС с характерными дефектами: 1 — непровар в корне; 2 — несплавление по разделке; 3 — цепочка внутренних пор.

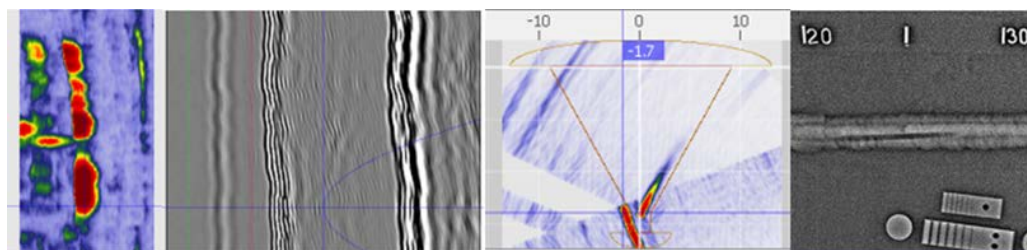


Рис. 2. Акустическое изображение несплавления по разделке кромок длиной 65 мм (полученное при секторном сканировании с фокусировкой по расстоянию) и его радиографический снимок.

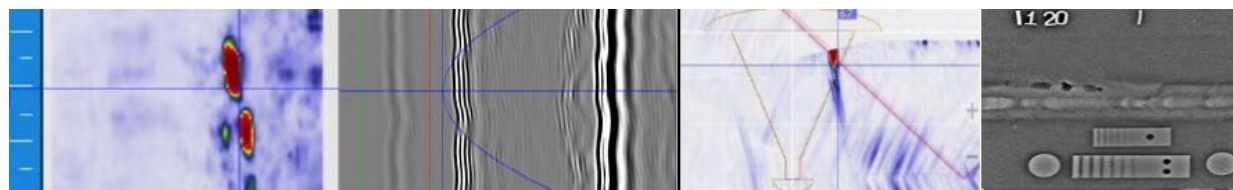


Рис. 3. Акустическое изображение цепочки пор длиной 25 мм (полученное при линейно-секторном сканировании с фокусировкой по расстоянию) и его радиографический снимок.

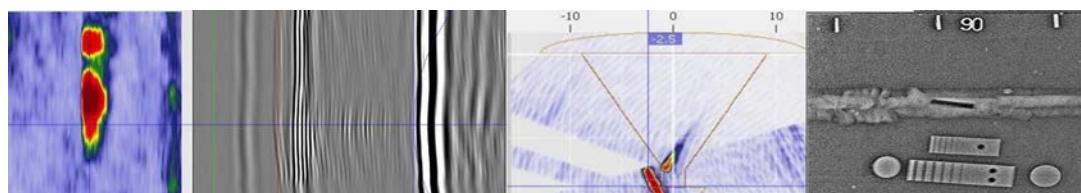


Рис. 4. Акустическое изображение непровара в корне длиной 26 мм (полученное при секторном сканировании с фокусировкой по расстоянию) и его радиографический снимок.

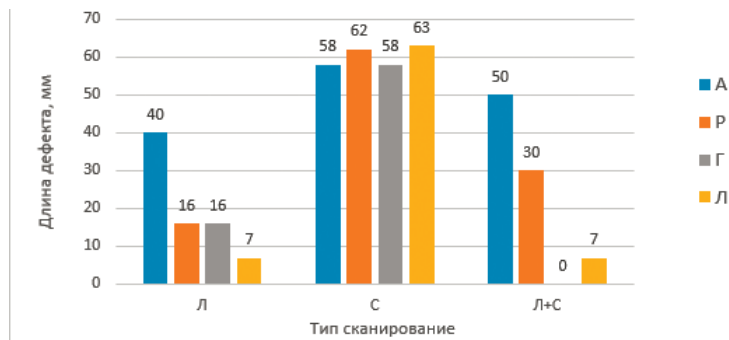


Рис. 5. Сравнение протяженности акустического изображения несплавления по разделке кромок длиной 65 мм, полученного на разных типах фокусировки (А — автоматическая; Р — по расстоянию; Г — по глубине; Л — по лучу) и разных схемах сканирования (Л — линейное; С — секторное; Л+С — линейно-секторное).

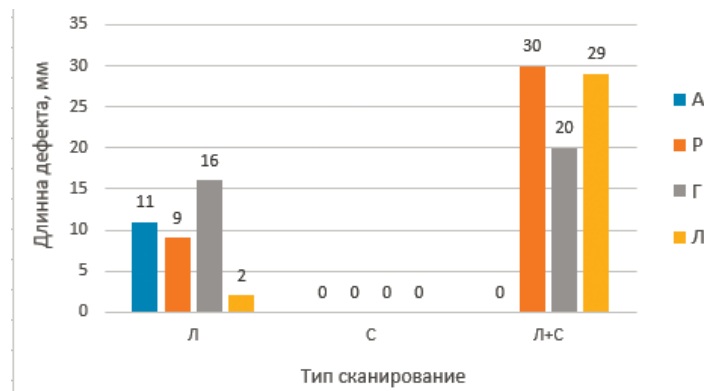


Рис. 6. Сравнение протяженности акустического изображения цепочки пор длиной 25 мм, полученного на разных типах фокусировки (А — автоматическая; Р — по расстоянию; Г — по глубине; Л — по лучу) и разных схемах сканирования (Л — линейное; С — секторное; Л+С — линейно-секторное).

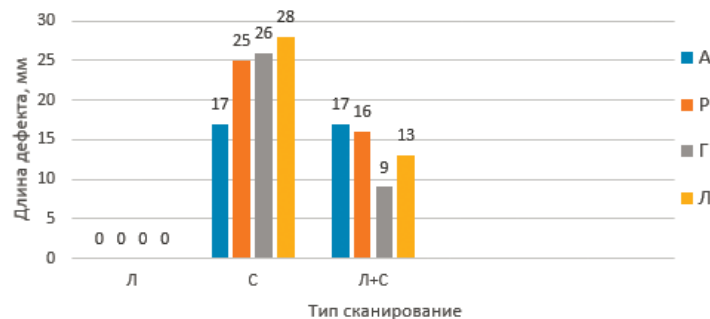


Рис. 7. Сравнение протяженности акустического изображения непровара длиной 26 мм, полученного на разных типах фокусировки (А — автоматическая; Р — по расстоянию; Г — по глубине; Л — по лучу) и разных схемах сканирования (Л — линейное; С — секторное; Л+С — линейно-секторное).



Рис. 8. Сравнение амплитуд эхосигналов от непровара при работе с ФАР на разных типах фокусировки и сканирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные методами ФАР и ДВМ акустические изображения дефектов и их размеры (рис. 2—4) сопоставлялись с эталонными дефектограммами и реальными размерами дефектов (рис. 5—7). По результатам анализа были разработаны рекомендации по выбору способа сканирования и фокусировки и их эффективности при обнаружении характерных дефектов сварки магистральных трубопроводов. Также сформулированы критерии идентификации и интерпретации дефектов на сканах ДВМ в виде атласа характерных дефектов сварных швов магистральных трубопроводов [6].

ВЫВОДЫ

1. При секторном сканировании эффективно выявляются плоскостные дефекты (см. рис. 5, 7). Их условная протяженность при фокусировке по расстоянию и по лучу соответствует реальной протяженности. Однако ввиду пропуска некоторых объемных дефектов (см. рис. 6) секторное сканирование допускается только с совместным использованием метода ДВМ. При этом (для исключения ложных дефектов от обратного валика шва) определение условных размеров и допустимость по амплитуде при секторном сканировании должны проводиться в режиме одного угла.

2. При линейном сканировании возможно пропускание вертикально ориентированных плоскостных дефектов (см. рис. 7). Поэтому вместо линейной схемы сканирования рекомендуется применять линейно-секторное сканирование с фокусировкой по расстоянию и по лучу. Это также обеспечит более точное определение условной протяженности дефектов (близкое к их реальной протяженности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мендес-Монтеро Ф., Кантемиров И.Ф., Вальес-Лосано Дж. Перспективы и развитие нормативной документации по применению технологии фазированных решеток в РФ // Наука, техника и образование. 2020. № 5 (69). С. 16—19.
2. ГОСТ ISO 13588—20. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой метод. Автоматизированная технология с применением фазированной решетки.
3. ГОСТ Р 50.05.13—2019. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии ультразвуковой контроль сварных соединений с применением технологии фазированных решеток. Порядок проведения.
4. РД-25.160.10-КТН-016-15. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов.
5. ГОСТ ISO 10863:2022. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль. Применение дифракционно-временного метода (TOFD).
6. Атрощенко В.В., Аджибае Д.А., Савичев М.П. Разработка методики механизированного ультразвукового контроля равнотолщинных стыковых сварных соединений дифракционно-временным методом / В сборнике: Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Сборник статей 8-й Международной научно-технической конференции. Могилев, 2022. С. 16—20.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СТРУКТУРЫ БАЗОВОГО И ИНЖЕНЕРНОГО ПЛАСТИКОВЫХ ФИЛАМЕНТОВ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2023 г. Т.С. Абрамова^{1,*}, С.А. Бехер^{2,**}

¹ ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет путей сообщения,
Россия 630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
E-mail: *t.abramova658@gmail.com; **behers@mail.ru

Поступила в редакцию 08.06.2023; после доработки 05.07.2023
Принята к публикации 14.07.2023

Проведен сравнительный анализ прочностных характеристик двух пластиков, базового и инженерного, которые применяются в 3D-печати. Исследована боковая поверхность разрушенных образцов проволоки под микроскопом Альтами MET 1C для оценки равномерности распределения деформации по длине.

Ключевые слова: аддитивные технологии, пластик, проволока, растяжение, механические характеристики, неоднородная деформация, ABS, НИТ-ING, метод послойного наплавления, FDM.

COMPARATIVE TESTS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS AND STRUCTURE OF BASIC AND ENGINEERING PLASTIC FILAMENTS FOR ADDITIVE MANUFACTURING

T.S. Abramova^{1,*}, S.A. Bekher^{1,**}

¹Siberian Transport University, st. Dusi Kovalchuk, 191, Novosibirsk, 630049, Russia
E-mail: *t.abramova658@gmail.com; **behers@mail.ru

A comparative analysis of the strength characteristics of two plastics, basic and engineering, which are used in 3D-printing, was carried out. The lateral surface of the destroyed wire samples was studied under the Altami MET 1C microscope to assess the uniformity of the strain distribution along the length.

Keywords: additive technologies, plastic, wire, tension, mechanical characteristics, inhomogeneous deformation, ABS, NIT-ING, layer-by-layer deposition method, FDM.

DOI: 10.31857/S013030822310007X, EDN: XCFAFB

ВВЕДЕНИЕ

Трехмерная печать осуществляется путем выдавливания через экструдер пластиковой проволоки — филамента [1, 2]. Материал филамента принято классифицировать на базовый и инженерный [3]. Напечатанные детали должны выдерживать рабочую нагрузку, так как их разрушение может привести к отказу. На данном этапе развития аддитивных технологий способы входного и приемочного контроля качества материалов и конечных изделий недостаточно развиты. Надежность и безотказность деталей зависит от механических свойств применяемых материалов [4, 5], структуры и дефектности изделия [6].

Цель работы — сравнительные испытания механических характеристики и закономерностей пластической деформации базового ABS-пластика и инженерного НИТ-ING.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для исследования механических характеристик пластиковой проволоки испытаны: ABS-пластик по ГОСТ 33366.1—2015 и НИТ-ING. Растяжение проволоки до разрушения проводили на установке МИ-40 КУ с постоянной скоростью 5 мм/мин. Проволока крепилась в захваты установки с помощью специальных переходных элементов. Проведено пять испытаний для каждого материала. Рабочая длина образцов составляла 150 мм, начальный диаметр — 1,75 мм.

Результаты испытаний сохранялись в цифровом виде. По полученным данным построены графики (рис. 1), по которым рассчитаны основные механические характеристики. После испытаний боковая цилиндрическая поверхность проволоки исследовалась под микроскопом Альтами MET 1C.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Временное сопротивление и относительное остаточное сужение ABS-пластика являются наиболее стабильными величинами, их случайный разброс не превышает 12 % среднего значения (табл. 1). Относительный разброс упругих характеристик значительно больше и составляет 23 и 17 % соответственно. Максимальная случайная неопределенность наблюдается для относительного остаточного удлинения образца. Это связано с неравномерностью пластической деформаций по длине образца и достаточно случайным процессом формирования шейки.

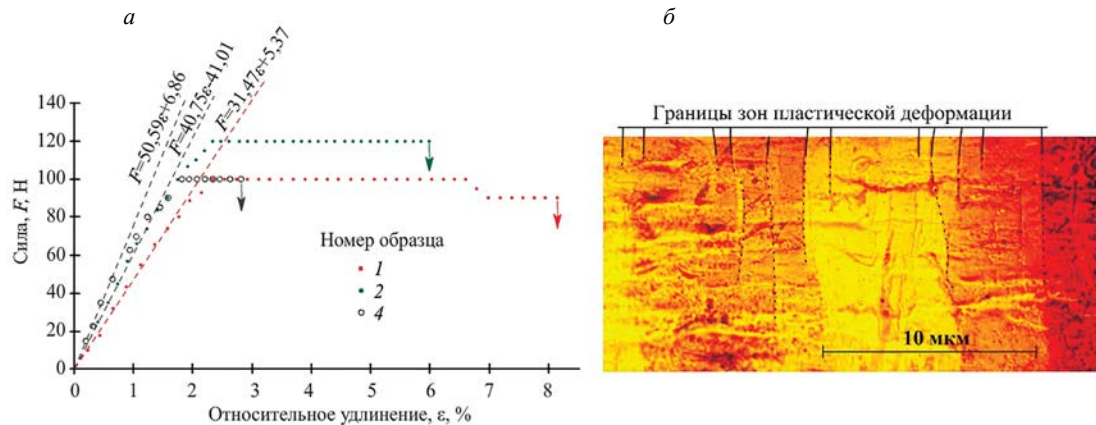


Рис. 1. Результаты испытаний проволоки ABS-пластика: зависимость силы от относительного удлинения (а); боковая поверхность проволоки при увеличении $\times 500$ (б).

Таблица 1

Механические характеристики проволоки из ABS-пластика

	$\sigma_{\text{тп}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	ε , %	ψ , %	E , ГПа
Среднее значение	27,5	44,6	5,2	-5,0	1,8
СКО	6,4	4,7	2,3	0,6	0,3
Относительное СКО, %	23	11	44	12	17

На боковых поверхностях проволоки наблюдается неравномерная пластическая деформация (рис. 1б). Размеры зон с разным уровнем деформации составляют (1—4) мкм с достаточно резким переходом между зонами не более 0,2 мкм. Раскрытия трещин при максимальном увеличении по границам зон не обнаружено.

При испытаниях инженерного пластика НИТ-ING проволока растягивалась до максимального предела перемещения traversы испытательной машины. В области переходных элементов наблюдалось уменьшение диаметра проволоки, ослабление силы прижатия, из-за чего происходило выскальзывание. На диаграмме растяжения (рис. 2а) это проявлялось в виде резкого, скачкообразного уменьшения нагрузки.

Упругие характеристики пластика НИТ-ING такие, как предел пропорциональности и модуль упругости являются более статистически неопределенными величинами, среднее квадратичное отклонение которых составило 23 и 15 % соответственно. Высокие пластические свойства материала подтверждаются фотографиями боковой поверхности проволоки, на которой отсутствуют признаки неоднородной деформации (рис. 2б).

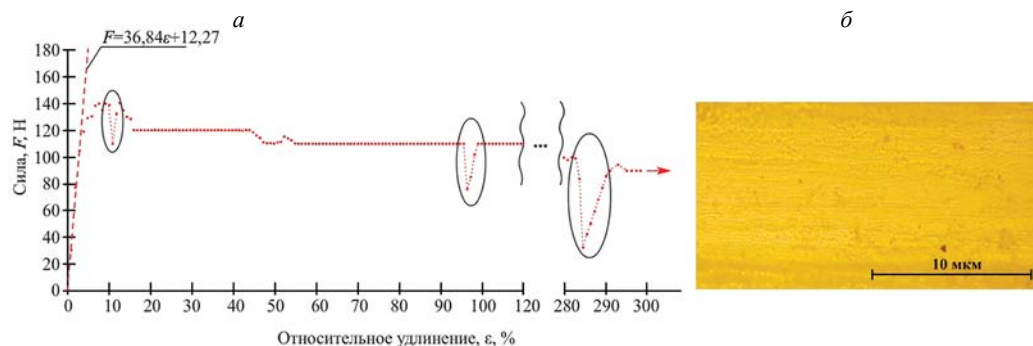


Рис. 2. Результаты испытаний проволоки НИТ-ING: зависимость силы от относительного удлинения (а); боковая поверхность проволоки при увеличении $\times 1000$ (б).

Таблица 2

Механические характеристики проволоки НИТ-ING

	$\sigma_{\text{пл}}, \text{ МПа}$	$\varepsilon, \%$	$\psi, \%$	$E, \text{ ГПа}$
Среднее значение	26	300*	57*	1,3
СКО	5,9	—	—	0,2
Относительное СКО, %	23	—	—	15

* максимальное полученное в экспериментах значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Границы упругого деформирования обоих материалов совпадают, так как разница между значениями предела пропорциональности (28 ± 6) МПа для ABS и (26 ± 6) МПа для НИТ-ING не превышает их среднего квадратического отклонения. Способность обоих материалов сохранять форму в упругой области, жесткость изделия, характеризуемая модулем упругости ($1,8 \pm 0,3$) МПа для ABS и ($1,3 \pm 0,2$) МПа НИТ-ING, отличается не более чем на 30 %.

При увеличении растягивающих напряжений выше предела пропорциональности наблюдается переход в область пластических деформаций. На боковой поверхности ABS-пластика в области шейки образуются зоны неоднородной пластической деформации, в отличие от пластика НИТ-ING, для которого характерна однородная деформация по всей длине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тигнибидин А.В., Такаюк С.В. Использование аддитивных технологий при прототипировании. Контроль геометрических характеристик детали из пластика ABS для определения исходных размеров для печати // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6. № 2. С. 57—65.
2. Титов Г.А. Материалы для аддитивных технологий в строительстве // Инженерные исследования. 2022. № 3 (8). С. 38—49.
3. Жуков А.В., Никифоров А.А., Яковичин А.С. Пластмассы для аддитивных технологий (обзор) // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2021. № 4 (91). С. 57—70.
4. Леонович И.А., Адинцов Д.Д. Исследование свойств ABS-пластика в образцах, полученных по технологии FFF-печати // Вестник Белорусско-Российского университета. 2023. № 1 (78). С. 13—21.
5. Абрамушкина О.И., Узорина М.И., Суриков П.В., Ушакова О.Б. Исследование реологического поведения марок ABS-пластика для производства филаментов для 3D печати методом послойного наплавления // Пластические массы. 2021. № 5—6. С. 29—35.
6. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Минаев В.Л., Иванов А.Д. Аппаратура для диагностики параметров изделий аддитивных технологий // Фотоника. 2019. Т. 13. № 6. С. 544—547.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОСЛОЕК РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© 2023 г. В.А. Барат^{1,*}, А.Ю. Марченков^{1,**}, А.Ю. Поройков¹, М.В. Карпова¹, В.В. Бардаков^{1,2}

¹ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Россия 11250 Москва, ул. Красноказарменная, 17

²ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Россия 11024 Москва, Шоссе Энтузиастов, 20Б

E-mail: *BaratVA@mpei.ru; **MarchenkovAY@mpei.ru

Поступила в редакцию 31.05.2023; после доработки 23.06.2023

Принята к публикации 30.06.2023

Исследуется возможность выявления методом акустической эмиссии (АЭ) специфических структурных дефектов разнородных сварных соединений — карбидных и обезуглероженных прослоек, образующихся в разнородных сварных соединениях сталей аустенитного и перлитного классов в процессе сварки и при последующей эксплуатации.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, разнородные сварные соединения, диффузионные прослойки.

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION AND DIGITAL IMAGE CORRELATION FOR DETECTING DIFFUSION INTERLAYERS IN DISSIMILAR WELDED JOINTS

V.A. Barat^{1,*}, A. Yu. Marchenkov^{1,**}, A.Yu. Poroykov¹, M.V. Karpova¹, V.V. Bardakov^{1,2}

¹National Research University MPEI, Krasnokazarmennaya str, 17, Moscow, 11250, Russia

²LLC «INTERUNIS-IT», shosse Entuziastov str, 20B, Moscow, 11024, Russia

E-mail: *BaratVA@mpei.ru; **MarchenkovAY@mpei.ru

The paper investigates the possibility of using the acoustic emission (AE) method to detect carbide and decarburized interlayers formed in dissimilar welded joints of austenitic and pearlitic steels during welding and subsequent operation.

Keywords: acoustic emission, dissimilar welded joints, diffusion interlayers.

DOI: 10.31857/S0130308223100081, EDN: XAGWBW

Предметом настоящей работы являются диффузионные прослойки, образующиеся в разнородных сварных соединениях сталей перлитного и аустенитного классов в процессе сварки или при длительной эксплуатации в условиях высоких температур [1]. Наличие таких прослоек приводит к снижению механических и эксплуатационных характеристик сварного соединения, поэтому их своевременное выявление является актуальной задачей. Диффузионные прослойки, как структурный дефект, обычно имеют малую толщину и не могут быть обнаружены традиционными методами неразрушающего контроля, в то же время метод АЭ является перспективным для обнаружения подобных дефектов.

Образцы разнородных сварных соединений выполнялись из сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т аргонодуговой сваркой с использованием аустенитной присадочной проволоки Sabaros SW146. В результате был получен сварной шов с аустенитной структурой (рис. 1а). Для получения в сварных соединениях диффузионных прослоек дополнительно проводилась термическая обработка (рис. 1б). Из полученных сварных соединений были изготовлены образцы с размерами рабочей части 230×20×3 мм, которые испытывались на статическое растяжение до разрушения с постоянной скоростью деформирования 2 мм/мин. Регистрация данных АЭ проводилась с помощью комплекса A-Line 32D с преобразователями GT200 (резонансная частота 180 кГц). Порог амплитудной дискриминации был выбран равным 40 дБ, для подавления шума использовался цифровой фильтр с полосой пропускания 100—400 кГц. Для измерения локальной деформации использовался метод корреляции цифровых изображений на основе измерительной системы LaVision с двумя монохромными CCD-камерами (разрешение 2456×2058 пикселей, размер матрицы 2/3 дюйма), обработка изображений проводилась с помощью программного обеспечения DaVis 8.4.

На рис. 2а показаны диаграмма растяжения и график АЭ-активности для образца с диффузионными прослойками. На графике активности помимо двух пиков, соответствующих пределам

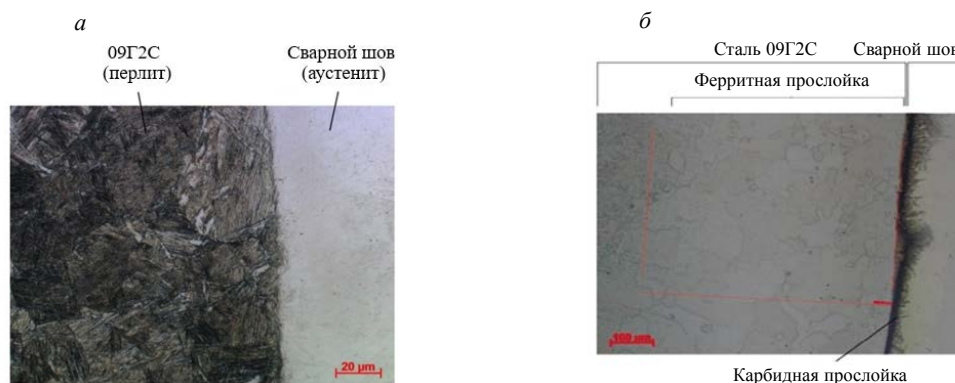


Рис. 1. Линия сплавления со стороны стали 09Г2С бездефектного образца (а); образца с диффузионными прослойками (б).

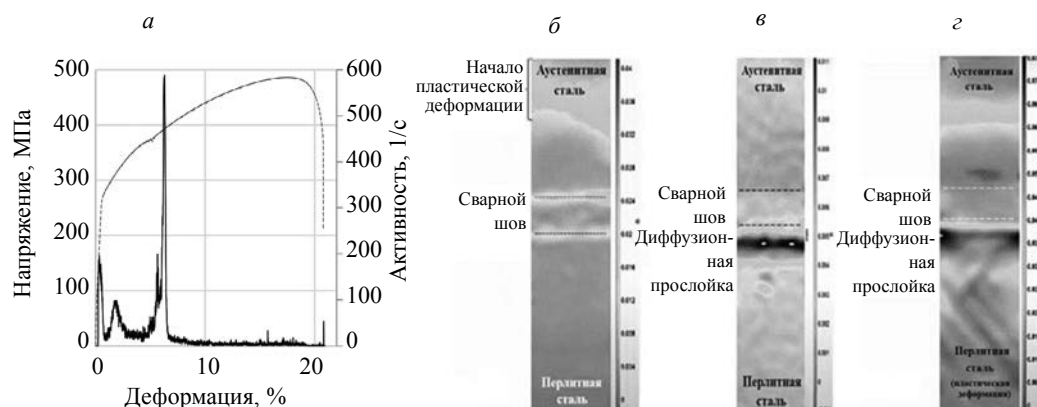


Рис. 2. АЭ-данные при растяжении образца с диффузионными прослойками (а) и карты локальных деформаций при 250 (б); 300 (в); 400 МПа (г).

текучести основного металла (250 МПа для стали 12Х18Н10Т и 370 МПа для 09Г2С) присутствует дополнительный экстремум при 300 МПа, соответствующий развитой упругопластической деформации обезуглероженной прослойки [2]. На рис. 2б—г показаны карты локальных деформаций, измеренные методом DIC, соответствующие моментам появления каждого из трех пиков АЭ-активности. Анализ карт деформации подтверждает, что первый экстремум соответствует началу пластической деформации стали 12Х18Н10Т, последний — деформации стали 09Г2С, а промежуточный экстремум — деформации обезуглероженной диффузионной прослойки.

На рис. 3, 4 показаны распределения времен нарастания и амплитуд импульсов АЭ, во временных интервалах, соответствующих каждому из пиков АЭ-активности. Процесс деформации диффузионной прослойки характеризуется узким диапазоном изменения времен нарастания и большими значениями амплитуд импульсов АЭ по сравнению с деформацией основного металла [3].

При совместном применении методов АЭ и цифровой корреляции изображений было установлено, что диффузионные прослойки разнородных сварных соединений могут быть выявлены методом АЭ при статическом растяжении по дополнительному пику АЭ-активности, который соответствует деформации обезуглероженной диффузионной прослойки и характеризуется специфическими значениями АЭ-параметров, отличными от параметров при деформации основного металла, что может быть объяснено локальностью процесса деформации и более крупнозернистой структурой металла на линии сплавления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00657, <https://rscf.ru/project/23-29-00657/>

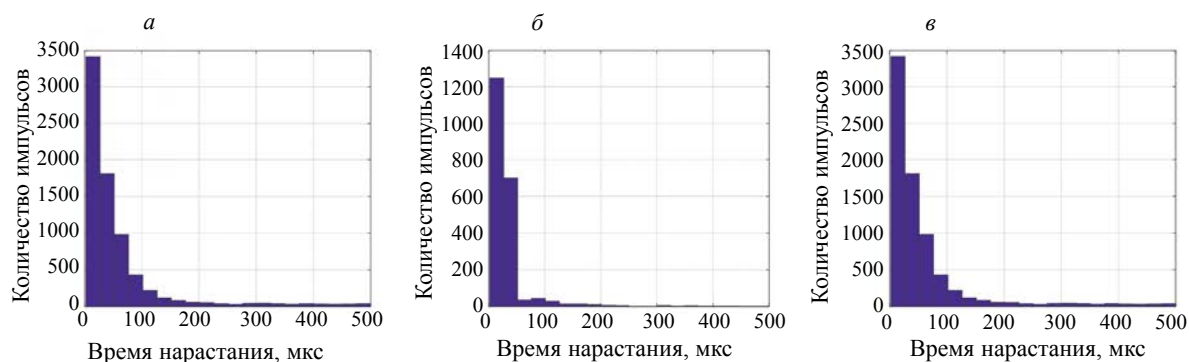


Рис. 3. Распределение времени нарастания импульсов АЭ при разных напряжениях: 250 (*a*); 300 (*б*); 400 МПа (*в*).

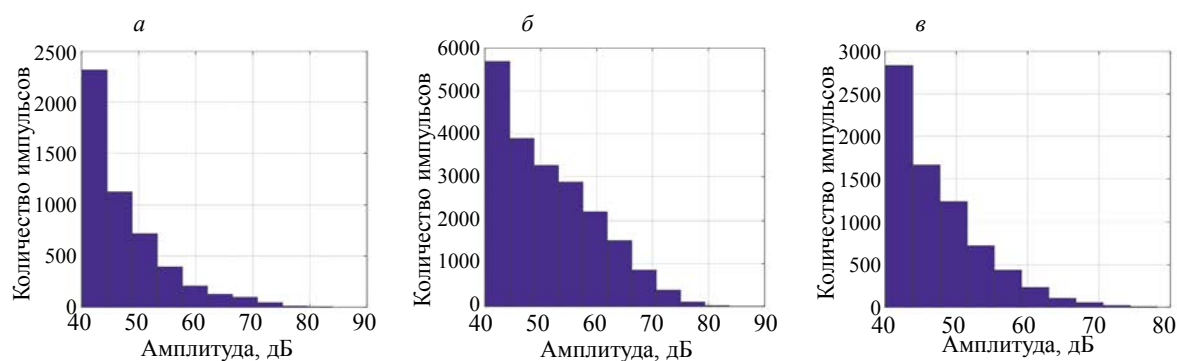


Рис. 4. Распределение амплитуд импульсов АЭ при разных напряжениях: 250 (*a*); 300 (*б*); 400 МПа (*в*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходаков В.Д., Ходаков Д.В. Природа и механизм образования разнородных сварных соединений атомноэнергетического оборудования из сталей аустенитного и перлитного класса // Сварочное производство. 2015. № 12. С. 3—9.
2. Виноградов А.Ю., Мерсон Д.Л. Природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлических материалах // Физика низких температур. 2018. Т. 44. № 9. С. 1186—1195.
3. Barat V., Marchenkov A., Bardakov V., Karpova M., Zhgut D., Elizarov S. Features of Acoustic Emission in Tensile Testing of Dissimilar Welded Joints of Pearlitic and Austenitic Steels // Appl. Sci. 2021. No. 11. P. 11892. 10.3390/app112411892

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ЧЕРЕЗ УТОЛЩЕННУЮ АУСТЕНИТНУЮ НАПЛАВКУ

© 2023 г. И.В. Михайлов^{1,*}, А.Н. Разыграев^{1,**}, Н.П. Разыграев^{1,***}

¹АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Россия 115088 Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4
E-mail: *IVMikhaylov@cniitmash.com; **ANRazygraev@cniitmash.com; ***NPRazygraev@cniitmash.com

Поступила в редакцию 30.05.2023; после доработки 13.06.2023

Принята к публикации 07.07.2023

Представлены результаты исследований влияния утолщенной ремонтной антикоррозионной наплавки на предэксплуатационный и эксплуатационный ультразвуковой контроль (УЗК) металла корпуса реактора через антикоррозионную наплавку в сравнении с УЗК через стандартную наплавку, предусмотренную конструкторской документацией [1]. В работе выполнены оценки искажения акустических полей преобразователей поперечных и продольных волн и выявляемости дефектов при УЗК через наплавки разной толщины и наплавку с наклонной зоной сплавления от толщины 11 мм к толщине 18 мм.

Ключевые слова: ультразвуковая дефектоскопия, неразрушающий контроль, антикоррозионная наплавка.

ULTRASONIC TESTING THROUGH A THICKENED CLADDING

I.V. Mikhaylov^{1,*}, A.N. Razygraev^{1,**}, N.P. Razygraev^{1,***}.

¹JSC «NPO "CNIITMASH», Sharikopodshipnikovskaya st. 4, Moscow, 115088, Russia
E-mail: *IVMikhaylov@cniitmash.com; **ANRazygraev@cniitmash.com; ***NPRazygraev@cniitmash.com

This paper presents the results of studies of the effect of thickened repair anti-corrosion surfacing on pre-operational and in-service ultrasonic testing (UT) of the reactor vessel metal through anti-corrosion cladding in comparison with ultrasonic testing through standard surfacing provided for by the design documentation [1]. The paper estimates the distortion of acoustic fields of transducers of transverse and longitudinal waves and the detectability of defects during ultrasonic testing through cladding of different thicknesses and cladding with an inclined fusion zone from a thickness of 11 mm to a thickness of 18 mm

Keywords: ultrasonic testing, non-destructive testing, anti-corrosion cladding.

DOI: 10.31857/S0130308223100093, EDN: XCETMV

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с конструкторской документацией, толщина антикоррозионной наплавки корпуса реактора составляет 9 – 2/+4 мм. Реальная толщина антикоррозионной наплавки составляет около 11 мм. В результате ремонта на обечайке образовался участок с толщиной аустенитной антикоррозионной наплавки ~18 мм, что существенно отличается от значения, установленного конструкторской документацией. Для проведения исследований и для разработки рекомендаций по ультразвуковому контролю (УЗК) было изготовлено три образца с различной толщиной наплавки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Поставлена задача исследовать влияние утолщения на 3—7 мм аустенитной антикоррозионной наплавки относительно стандартной (толщина 9—13 мм), предусмотренной конструкторской документацией, на предэксплуатационный и эксплуатационный УЗК металла корпуса реактора через наплавку.

Предэксплуатационный и эксплуатационный УЗК металла выполняют продольными и поперечными волнами с применением [2]:

- прямых преобразователей (ПЭП) продольных волн с частотой 2,0 МГц;
- наклонных ПЭП поперечных волн 45° и 60° с частотой 2,0 МГц;
- наклонных ПЭП продольных волн 70° с частотой 2,0 МГц, 45° с частотой 4,0 МГц.

Проведены исследования сигналов поперечных и продольных волн при УЗК через наплавку и выявляемости дефектов при прохождении ультразвука через наплавки разной толщины и наплавку переменной толщины от 11 до 18 мм и зоной сплавления с наклонной по отношению к наружной (контактной для УЗК) поверхности.

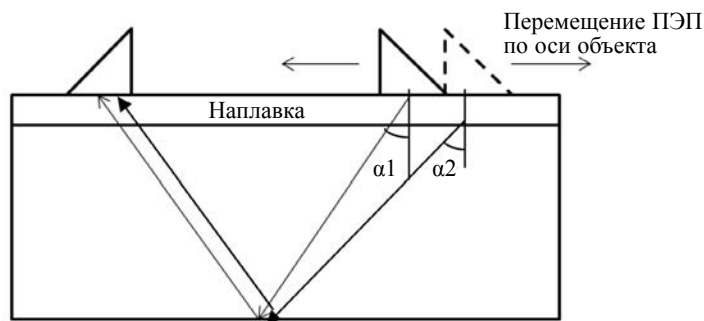


Рис. 1. Схема прозвучивания для наплавки толщиной 11, 16, 18 мм.

Для проведения вышеуказанных исследований были спроектированы и изготовлены специальные образцы с размерами 300×300 мм, толщиной наплавки 11 и 16 мм, и с переходной наплавкой, толщиной от 11 до 18 мм, а также однородные образцы для сравнительных испытаний прохождения ультразвука через моно и биметалл.

Оценку прохождения ультразвуковых волн через антикоррозионную аустенитную наплавку, толщиной 11, 16 и 18 мм проводили зеркально-теневым методом (рис. 1) на образцах с общей толщиной 90 мм, в том числе на образце из перлитной стали без наплавки. Распределение сигналов в образце из однородного металла считали эталонным. Оно позволяло оценить и зафиксировать влияние толщины, структуры металла наплавки, зоны сплавления наплавки (глубины ее залегания и непараллельности зоны сплавления контактной поверхности) с основным металлом и направления хода наплавочной ленты.

Исследованы огибающие амплитуд отраженных от дна сигналов поперечных и продольных волн, полученных с использованием преобразователей WB-45-2 и ПЦП-45-1,8 (рис. 2), на образцах с тремя наплавками, толщиной 11, 16 и 18 мм, а также на однородном перлитном металле. Полученные распределения позволяют оценить степень влияния толщины наплавки на структуру акустического поля преобразователей продольных и поперечных волн.

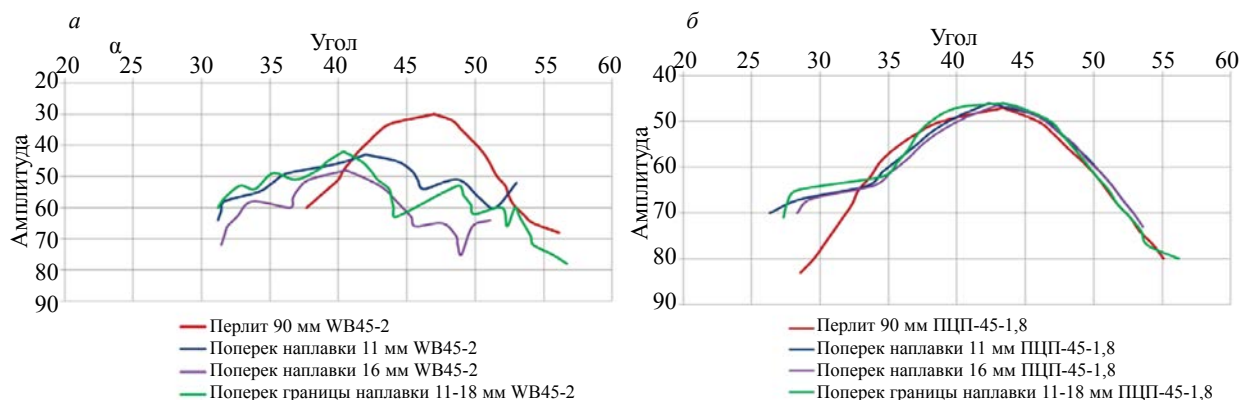


Рис. 2. Огибающие амплитуд сигналов на перлитном образце при прозвучивании через наплавку (поперек), толщиной 11 и 16 мм и на наклонной границе сплавления 11—18 мм:

а — УЗК поперечной волной (WB-45-2); б — УЗК продольной волной (ПЦП-45-1,8).

УЗК с помощью наклонных преобразователей продольных волн показал существенно меньшие искажения акустических полей в металле корпуса реактора в сравнении с преобразователями поперечных волн. Такие изменения параметров УЗК влекут за собой меньшие значения неопределенности при определении координат дефектов/отражателей и величин амплитуд эхосигналов от них, по которым определяется эквивалентная площадь дефекта.

В связи с полученными результатами были также выполнены исследования выявляемости дефектов/отражателей в металле корпуса реактора. Сравнительные исследования по выявляемости дефектов в сварных соединениях при УЗК через наплавку поперечными и продольными волнами были проведены на специальных образцах с плоскодонными отражателями диаметром 3,1 мм. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Эквивалентная площадь плоскодонных отверстий при УЗК через наплавку

№ п.п	ПЭП	Глубина, мм	Перлит Se, мм ²	Наплавка 11 мм Se, мм ²	Наплавка 16 мм Se, мм ²	Наплавка переходная 11—18 мм Se, мм ²
1	WB45-2	25	7,5	6,16	1,33	—
		50	7,5	1,77	0,95	2,01
		75	7,5	0,79	0,64	3,14
2	ПЦП-45-1,8	25	7,5	7,5	4,9	—
		50	7,5	7,1	4,15	4,9
		75	7,5	6,2	3,46	5,30

В табл. 2 представлены результаты исследований неопределенностей (отклонений) при определении глубины и координат дефектов при УЗК через наплавку, когда неизвестно действительное значение угла ввода луча с максимальной амплитудой в сравнении с контролем однородного перлитного металла [3].

Таблица 2

Характеристики плоскодонных отражателей при УЗК наплавки

№ п.п	ПЭП	Глубина по чертежу, мм	Наплавка 11 мм (измерения по дефектоскопу)		Наплавка 16 мм (измерения по дефектоскопу)		Наплавка переходная 11—18 мм (измерения по дефектоскопу)	
			Глубина, мм	Расстояние до эпитцентра, мм	Глубина по дефектоскопу, мм	Расстояние до эпитцентра, мм	Глубина, мм	Расстояние до эпитцентра, мм
1	WB45-2	25	25,7	25,7	24,5	24,5	—	—
		50	51,9	51,9	48,5	48,5	63	63
		75	76,7	76,7	76	76	75	75
2	ПЦП-45-1,8	25	24,88	24,88	26,3	26,3	—	—
		50	49	49	50,2	50,2	48,9	48,9
		75	73,7	73,7	73,8	73,8	73	73

Установлено, что:

1. При УЗК наклонными преобразователями поперечными волнами через аустенитную наплавку и определении эквивалентной площади с помощью АРД-диаграмм неопределенность может составлять величины, значительно превышающие погрешность определения эквивалентной площади при УЗК основного металла и сварных соединений.

2. При УЗК наклонными преобразователями продольными волнами через аустенитную наплавку и определении координат плоскодонных отражателей неопределенность (погрешность) при измерении глубины и расстояния до эпитцентра имеет величины в пределах погрешностей, установленных для УЗК основного металла и сварных соединений.

В связи с полученными результатами при контроле металла с утолщенной антикоррозионной наплавкой рекомендовано применять операцию УЗК наклонными раздельно-совмещенными преобразователями продольных волн с дополнительной настройкой чувствительности на образце с реальной толщиной аустенитной наплавки на контролируемом участке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разыграев А.Н., Михайлов И.В., Разыграев Н.П. Ультразвуковой контроль через утолщенную антикоррозионную наплавку / XXIV Петербургская конференция «Ультразвуковая дефектоскопия металлов и перспективных материалов» УЗДМ-2022. Тезисы докладов. 2022. С. 51—53.

2. ГОСТ Р 50.05.02 «Унифицированные методики. Ультразвуковой контроль сварных соединений и наплавленных покрытий».

3. Данилов В.Н., Разыграев Н.П. и др. Исследование ультразвукового контроля металла совмещенным наклонным преобразователем через плакирующий наплавленный слой // Контроль. Диагностика. 2018. № 7. С. 4—19.