

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
 Основан в феврале 1965 года
 Екатеринбург

№ 11
2021

СОДЕРЖАНИЕ**Акустические методы**

- Е.Г. Базулин, А.В. Гончарский, С.Ю. Романов, С.Ю. Серёжников.** Определение геометро-акустических свойств сварного соединения как решение обратной коэффициентной задачи для скалярного волнового уравнения 3
- Е.Г. Базулин, Л.В. Медведев.** Повышение скорости регистрации эхосигналов ультразвуковой антенной решеткой за счет оптимального прореживания коммутационной матрицы с помощью генетического алгоритма 15
- В.Г. Карташев, Э.И. Трунов, Е.В. Шалимова, Р.В. Концов.** Модернизация эхометода ультразвуковой дефектоскопии 24
- Р.С. Гайсин, В.Ю. Тюканько, А. В. Демьяненко.** Разработка метода ультразвукового контроля качества пластиковых изделий, полученных методом ротационного формования 34

Оптические методы

- А.А. Дедкова, И.В. Флоринский, Е.Э. Гусев, Н.А. Дюжев, М.Ю. Фомичев, М.Ю. Штерн.** Методика анализа объемных дефектов по цифровой модели рельефа поверхности 41

Электромагнитные методы

- Бин Ли, Цзювэй Чжан, Цихан Чен.** Неразрушающий контроль стальных тосов с использованием оптимизированного метода опорных векторов 49
- Информация 60

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРО-АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КАК РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СКАЛЯРНОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ

© 2021 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, А.В. Гончарский^{2,3,**}, С.Ю. Романов^{2,3,***}, С.Ю. Серёжников^{2,3,****}

¹ООО ЭХО+, Россия 123458 Москва, Технопарк Строгино

²МГУ им. Ломоносова, Россия 119992 Москва, Воробьевы горы, 1, стр.4

³Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Россия 119992 Москва

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

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

Поступила в редакцию 03.09.2021 г.; после доработки 20.09.2021 г.

Принята к публикации 20.09. 2021 г.

Разработаны ультразвуковые томографические методы неразрушающего контроля объектов с целью определения геометрии сварного соединения и оценки поля скоростей в нем. Предложено решение обратной коэффициентной задачи для схемы регистрации эхосигналов в зеркально-теневом режиме. Проведено численное моделирование для различных томографических схем на образцах с акустическими параметрами и геометрией, соответствующими реальному эксперименту с использованием антенной решетки с рабочей частотой 2.25 МГц. Численными методами проведена оптимизация томографических схем для разных прикладных задач. Показано, что с помощью разработанных томографических схем можно не только обнаружить границы сварного соединения, но и определить поле скоростей внутри объекта контроля.

Ключевые слова: обратные задачи, ультразвуковая томография, ультразвуковой неразрушающий контроль, антенная решетка, скорость продольной волны, FMC, C-SAFT, цифровая фокусировка антенной (ЦФА).

DOI: 10.31857/S0130308221110014

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача контроля сварных соединений является одной из важнейших и актуальных задач дефектоскопии при контроле объектов повышенной опасности, таких как трубопроводы и оборудование атомных станций, магистральные и промышленные газопроводы, компрессорные станции, уникальные изделия машиностроения и так далее. Одним из способов ее решения является получение высококачественных изображений внутреннего объема объекта контроля. В настоящее время для этого широко используются ультразвуковые антенные решетки, работающие в режиме физической фокусировки и в режиме цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [1]. Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов антенной решетки. Такой режим называется режим двойного сканирования (в зарубежной литературе FullMatrixCapture (FMC) [2]). Набор эхосигналов при излучении одним элементом антенной решетки называется выстрел. На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) (C-SAFT) [3] восстанавливается изображение отражателей. В отличие от ФАР-технологии, ЦФА-технология позволяет получать изображение с лучшей фокусировкой по всей ОВИ и, главное, применять самые разнообразные методы восстановления изображения отражателей, в том числе с учетом многократного отражения импульсов от границ анизотропно-неоднородного объекта контроля с учетом трансформации типа волны при отражении и преломлении [4—6]. Однако методу ЦФА свойственны и недостатки. Для того, чтобы восстанавливать высококачественные изображения отражателей нужно использовать акустические схемы с учетом отражения от дна объекта контроля и с учетом неоднородного распределения скорости распространения звука в основном металле и в сварном соединении. Но проблема в том, что эти параметры, как правило, неизвестны с достаточной точностью, и получение высококачественного изображения отражателя разбивается на две задачи. Первая — это определение геометро-акустических свойств объекта контроля, а вторая — это непосредственное восстановление ЦФА-изображения по многим акустическим схемам с учетом информации, полученной при решении первой задачи. Отсутствие достоверной информации о свойствах объекта контроля приводит к тому, что ультразвуковой контроль часто проводится только на прямом луче [7—9]. Еще один недостаток метода ЦФА в том, что с его помощью информация об отражателях восстанавливается в виде амплитуды вторичных источников, порожд-

денных падающей волной на границах контрастных несплошностей. Поэтому для выравнивания пространственно-временной чувствительности в пределах ОВИ для выделения отражателей, превышающих браковочный уровень, необходимо проводить специальную настройку дефектоскопа. Кроме того, работая с амплитудой вторичных источников, крайне сложно сделать вывод об акустических свойствах разных областей объекта контроля. Поэтому возникает необходимость в разработке таких алгоритмов визуализации внутренней структуры объекта контроля, которые были бы свободны от этих недостатков. Отметим также исследования по применению лучевых моделей в томографии для нахождения скорости распространения и поглощения звука в объекте контроля [10, 11]. Существуют направления «topological imaging», «time reverse», в которых основные усилия направлены на обнаружение границ неоднородных включений в отраженном излучении [12—18].

В настоящее время для проведения ультразвукового контроля начинают использоваться более сложные методы волновой томографии, которые хорошо зарекомендовали себя в медицине и в сейсмике [19—23]. Решение коэффициентной обратной задачи позволяет получать изображение в виде значения скорости распространения звука в объекте контроля (поле скоростей), а задача определения геометро-акустических свойств объекта контроля и задача восстановления изображения решаются одновременно, что является принципиальным отличием обратной коэффициентной задачи от методов подобным ЦФА. В сейсмике итерационные методы решения коэффициентной обратной задачи волновой томографии получили название «full wave form inversion» [24—26]. В работах [27, 28] было показано, что можно решить обратную коэффициентную задачу для твердого тела, когда источники и приемники ультразвука располагались со всех сторон от исследуемого объекта. Однако такая постановка задачи характерна для медицинской диагностики, а не для ультразвукового контроля. Поэтому необходимо оценить возможность решения обратной задачи ультразвукового неразрушающего контроля методами волновой томографии в зеркально-теневом режиме, когда антенную решетку или решетки можно разместить только на внешней поверхности объекта контроля [29, 30, 11].

В работе исследована томографическая схема зондирования объекта при размещении ультразвуковой антенной решетки на внешней поверхности объекта контроля с целью восстановления поля скоростей и формы как сварного соединения, так и основного металла. Использование эхосигналов, отраженных от дна объекта контроля, является принципиальным, поскольку позволяет значительно увеличить количество ракурсов зондирования и регистрировать проходящие через сварное соединение волны. В статье проведены результаты численного моделирования для различных томографических схем, что позволяет провести оптимизацию томографических схем для разных прикладных задач. Рассматриваемые томографические обратные задачи ультразвукового неразрушающего контроля требуют больших объемов вычислений. Для решения таких задач необходимо использовать высокопроизводительные вычислительные системы [28, 31].

2. ПОСТАНОВКА ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ ОБЪЕКТОВ С ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ И СПОСОБ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Ограничимся рассмотрением волн, описываемых скалярным волновым уравнением. В силу своей относительной простоты скалярная волновая модель широко используется при проведении расчетов в ультразвуковом неразрушающем контроле. Она позволяет рассчитывать скалярное волновое поле $u(\mathbf{r}, t)$ по заданным начальным данным, пользуясь уравнением:

$$c(\mathbf{r})u_{tt}(\mathbf{r}, t) - \Delta u(\mathbf{r}, t) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)g(t); \quad (1)$$

$$u(\mathbf{r}, t = 0) = u_t(\mathbf{r}, t = 0) = 0. \quad (2)$$

Здесь $c^{-0.5}(\mathbf{r}) = v(\mathbf{r})$ — скорость продольной волны в среде, $\mathbf{r} \in \mathbf{R}^2$; Δ — оператор Лапласа по переменной \mathbf{r} ; δ — функция Дирака, которая задает положение точечного источника в точке \mathbf{r}_0 , который излучает зондирующий импульс вида $g(t)$. Уравнение (1) хорошо описывает явления дифракции, рефракции волн и перерасеивания на неоднородностях объекта контроля.

Проведем постановку обратной задачи томографической ультразвуковой диагностики плоских объектов. Рассмотрим простейшую двумерную задачу (рис. 1), в которой области 1 и 2 (основной металл) изготовлены из одного и того же материала и разделены областью из другого материала 3 (сварное соединение). Скорость распространения продольной волны $v(\mathbf{r})$ в областях 1 и 2 постоянна и равна $v(\mathbf{r}) = \text{const} = v_0$. Скорость волны $v(\mathbf{r})$ в области 3 может быть неоднородна и ее форма

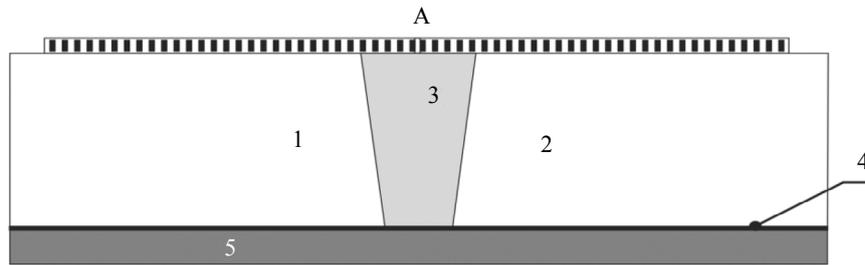


Рис. 1. Схема томографического эксперимента при размещении антенной решетки на внешней поверхности объекта контроля.

точно неизвестна. На верхней границе пластин располагается линейная антенная решетка, обозначенная буквой А. Цифрой 4 на рис. 1 обозначена нижняя граница областей 1, 2 и 3. Ниже границы 4 располагается однородная среда 5 (например, воздух или вода). Скорость продольной волны $v(\mathbf{r})$ в области 5 постоянна и известна, эта скорость сильно отличается от скоростей в областях 1, 2, 3. Из-за большого изменения импеданса на границе 4 ультразвуковые волны, излучаемые антенной решеткой А, отражаются от границы 4 и регистрируются ею.

Будем считать, что излучаемые источниками ультразвуковые волны отражаются от нижней границы 4 по какому-либо одному из стандартных законов:

$$\partial_n^k u(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}, t), \quad (k = \text{либо } 0, \text{ либо } 1), \quad (3)$$

где $\partial_n^k u(\mathbf{r}, t)$ при $k = 1$ обозначает производную вдоль нормали к границе 4, а при $k = 0$ обозначает значение функции $u(\mathbf{r}, t)$ на границе 4; $p(\mathbf{r}, t)$ — некоторая известная функция. Значение параметра k определяется типом отражения и для каждой конкретной задачи известно. К подобной постановке граничных условий приводит, например, случай свободной поверхности или неподвижной границы (в этих случаях $p(\mathbf{r}, t) = 0$).

На верхней границе областей 1, 2 и 3 в численном эксперименте будем ставить условие «неотражения» второго порядка точности в виде $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \frac{1}{v} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{v}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$ [32]. Заметим, что в реальном эксперименте на верхней границе происходит отражение волн, однако при решении обратной задачи волнами, отраженными от этой границы, можно пренебречь. Для этого время T окончания регистрации эхосигналов на элементах антенной решетки выбирается так, чтобы отсечь прием этих импульсов. Надо отметить, что учет многократно отраженных волн от границ объекта контроля должен привести к более устойчивому и точному решению обратной коэффициентной задачи. Условие «неотражения» поставим также на боковых границах: левая граница области 1 и правая граница области 2.

В численном эксперименте использовалась следующая схема измерений ультразвуковых волн. Антенная решетка А работает в режиме, когда заданные элементы излучают зондирующий импульс, распространяются в областях 1, 2, 3, однократно отражаются от границы 4, а эхосигналы измеряются всеми элементами решетки А.

Обозначим зарегистрированные антенной решеткой эхосигналы через $U^{ij}(t)$, где индекс j соответствует элементам, излучающим импульс ($j = 1, \dots, M$), i — соответствует элементам, принимающим импульс ($i = 1, \dots, M$), M — количество элементов на антенной решетке. Обозначим через $u^{ij}(t)$ значение волнового поля $u(r, t)$, рассчитанное из уравнений (1) — (3) в точке i -го приемного элемента при излучении источником номер j . Таким образом, можно записать для разных положений источников и приемников уравнение:

$$u^{ij}(t) = U^{ij}(t). \quad (4)$$

Совокупность уравнений (1) — (4) описывает задачу.

Обратная задача ультразвуковой томографической диагностики в скалярной модели заключается в реконструкции по уравнениям (1) — (4) неизвестной функции $v(r)$ в области 3, форма и положение которой неизвестно, по экспериментально измеренному волновому полю $U^{ij}(t)$ на принимающих элементах при зондировании излучающими элементами с известной функцией $g(t)$, при известных положениях элементов антенной решетки.

Прямая задача описывается уравнениями (1)—(3) и позволяет для произвольной функции $c(\mathbf{r})$, которая определяется функцией скоростей $v(\mathbf{r})$ по формуле $c(\mathbf{r}) = v^{-2}(\mathbf{r})$, вычислить волновое поле $u(\mathbf{r}, t; c)$. Рассмотрим функционал невязки $\Phi(c)$ от аргумента $c(\mathbf{r})$ между экспериментальными данными $U^j(t)$ и рассчитанным при заданном $c(\mathbf{r})$ полем на детекторах:

$$\Phi(c) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M \frac{1}{2} \int_0^T (u^j(t; c) - U^j(t))^2 dt. \quad (5)$$

Здесь $u^j(t; c)$ — значения волнового поля при решении прямой задачи (1)—(3) при заданном коэффициенте $c(\mathbf{r})$. При использовании нескольких источников зондирующего излучения функционал невязки представляет собой сумму по $j = 1, \dots, M$ значений невязки, полученных для каждого источника. При каждом фиксированном источнике j функционал интегрируется по времени $(0, T)$ и суммируется по всем приемникам $i = 1, \dots, M$, принимающим сигналы для выбранного источника. Математически обратная задача ставится как задача поиска функции $\bar{c}(\mathbf{r})$, минимизирующей функционал невязки (5) $\bar{c}(\mathbf{r}) : \min_{c(\mathbf{r})} \Phi(c) = \Phi(\bar{c})$. Функция $\bar{c}(\mathbf{r})$ принимается за приближенное решение обратной коэффициентной задачи.

Эффективными методами минимизации функционала невязки $\Phi(c)$ являются градиентные методы. Имея явное выражение для градиента, можно построить различные достаточно быстрые итеративные алгоритмы первого порядка минимизации функционала невязки. Численная оценка градиента функционала невязки, когда нет аналитического выражения расчета градиента, является вычислительно очень трудоемкой задачей даже для современных высокопроизводительных кластеров.

Кратко опишем процедуру прямого вычисления градиента функционала невязки. Рассмотрим задачу, которую назовем сопряженной к основной задаче (1)—(3):

$$c(\mathbf{r}) w_{tt}(\mathbf{r}, t) - \Delta w(\mathbf{r}, t) = u(\mathbf{r}, t) |_{\Gamma} - U(t); \quad (6)$$

$$w(\mathbf{r}, t = T) = w_t(\mathbf{r}, t = T) = 0; \quad (7)$$

$$\partial n^k w(\mathbf{r}, t) = 0, \quad (8)$$

где $u(\mathbf{r}, t)$ есть решение прямой задачи (1)—(3); $\partial_n^k w(\mathbf{r}, t)$ ($k = 0$ или 1) при $k = 1$ — производная вдоль нормали к границе 4, при $k = 0$ — значение функции $w(\mathbf{r}, t)$ на границе 4. Значение k такие же, что и в формуле (3). По аналогии с работами [22, 34] для приведенной постановки обратной задачи можно получить выражение для градиента функционала $\Phi(c)$:

$$\Phi'_c(c) = \int_0^T w_t(\mathbf{r}, t) u_t(\mathbf{r}, t) dt. \quad (9)$$

Здесь $u(\mathbf{r}, t)$ — решение прямой задачи (1)—(3), а $w(\mathbf{r}, t)$ — решение сопряженной задачи (6)—(8) при заданном $c(\mathbf{r})$. Таким образом, для вычисления градиента функционала необходимо решить основную и сопряженную задачи и рассчитать $\Phi'_c(c)$ по формуле (9).

Сформулированная задача восстановления скорости волны является нелинейной коэффициентной обратной задачей, так как $U(t)$ нелинейно зависит от $c(\mathbf{r})$. Количество неизвестных даже для двумерной задачи может быть больше $5 \cdot 10^5$, и для ее решения необходимо использовать высокопроизводительные вычислительные системы [33—36].

Особенность рассматриваемой томографической задачи в неразрушающем ультразвуком контроле состоит в том, что доступ к объекту контроля не может быть обеспечен с разных сторон, в отличие от постановки аналогичной задачи в медицинской диагностике. Источники и приемники обычно могут быть расположены только на внешней поверхности объекта контроля. Схема эксперимента, представленная на рис. 1, является типичной для задач контроля сварных соединений.

В рассматриваемой в статье томографической постановке помимо волн, отраженных от границ неоднородностей, регистрируются также проходящие через неоднородности волны, отразившиеся от дна. Дополнительный учет этих волн при решении обратной задачи позволяет определять скорость внутри неоднородностей, что чрезвычайно важно в задачах диагностики. Более того, инфор-

мация о скорости в сварном соединении позволяет учесть ее при восстановлении изображения методом ЦФА [11] и повысить качество изображения отражателей.

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные расчеты проводились для обратной 2D-задачи томографического неразрушающего ультразвукового контроля сварных соединений. Одной из проблем в задаче контроля сварных соединений плоских объектов, когда доступ к объекту возможен только на верхней границе, является отсутствие точной информации о расположении нижней границы, в том числе нижней границы сварного соединения. Эта информация важна как с точки зрения диагностики качества сварки, так и для корректного решения обратной задачи методом ЦФА, учитывающим неоднородность акустических свойств объекта контроля.

В настоящем разделе проведены численные эксперименты по определению положения нижней границы сварного соединения. Конечно, идеальный вариант для решения обратной задачи — когда положение границы 4 известно. Однако такое, как правило, недостижимо на практике: толщина трубы и скорость звука в нем известны с ошибкой порядка 0,5 %, а форма сварного соединения на внутренней стороне объекта контроля вообще неизвестна.

Относительно положения нижней границы 4 (см. рис. 1) будут рассмотрены три варианта. В первой постановке будем считать, что положение границы 4 известно, то есть известен вертикальный размер областей 1, 2 и 3. Во второй постановке положение границы 4 неизвестно, а в третьем варианте положение границы 4 известно только частично в области основного металла (области 1 и 2).

3.1. Определение формы нижней границы и скорости звука сварного соединения

3.1.1. Антенная решетка со 150 элементами

Область 3 модельного образца имитирует аустенитное сварное соединение и основной металл (области 1 и 2). Вертикальный размер областей 1 и 2 равен 45 мм. Под областью 3 граница 4 имеет выступ вниз размером 1,5 мм по вертикали. Он моделирует натек корня шва (провисание), который может возникнуть при сварке. Ширина области 3 на внешней границе равна 19 мм, на внутренней — 10 мм. Нижняя граница 4 под областями 1 и 2 задавалась ровной и параллельной горизонтальной оси. Расчетная область представляет собой объединение областей 1, 2, 3 и 5. В области 5 скорость полагалась постоянной и равной скорости звука в воде. На внешних границах расчетной области ставилось граничное условие «неотражения». После решения прямой задачи для уравнения (1) в неоднородной модельной среде, изображенной на рис. 2а, рассчитанные эхосигналы $u^{ij}(t)$ для каждого источника j сохранялись и использовались в качестве «экспериментально измеренных» эхосигналов $U^{ij}(t)$ для последующего решения обратной задачи. Предполагалось, что зондирующие импульсы для каждого излучающего элемента одинаковы и представляют собой короткий импульс с центральной частотой 2,25 МГц.

В численных расчетах использовались следующие значения параметров. Скорость распространения звука в областях 1 и 2 была равна $v_0 = 5,9$ мм/мкс (сталь), скорость распространения звука в области 3 (сварное соединение) — 5,7 мм/мкс (аустенитная сталь) и отличается от v_0 примерно на 3,4 %. Скорость распространения звука в области 5 была равна $v_1 = 1,5$ мм/мкс и отличается от v_0 почти в 4 раза. Длина волны λ центральной частоты широкополосного импульса равна $\lambda = 2,62$ мм, размер расчетной области — 200×50 мм, размер разностной сетки 800×200 точек. Антенная решетка состоит из 150 элементов шириной 1 мм с шагом 1,2 мм и расположена на верхней границе образца (см. рис. 2а). В расчетах для уменьшения объема вычислений в качестве источника использовался каждый третий элемент антенной решетки, всего около 50 положений источников. Для восстановления изображения использовалось 7 050 эхосигналов. Модельные расчеты показали, что использование всех элементов решетки в качестве источников принципиально не улучшает реконструированное поле скоростей, но объем вычислений увеличивается в 3 раза.

Приведем результаты решения обратных задач по определению положения нижней границы сварного соединения. На всех последующих рисунках для удобства восприятия будем приводить только фрагмент центральной части восстановленного изображения. На рис. 2б приведены результаты реконструкции в случае, когда положение нижней границы 4 известно полностью, то есть, например, известен вертикальный размер областей 1, 2 и 3. В качестве начального приближения итерационного процесса решения обратной задачи в областях 1, 2 и 3 на рис. 1 была выбрана

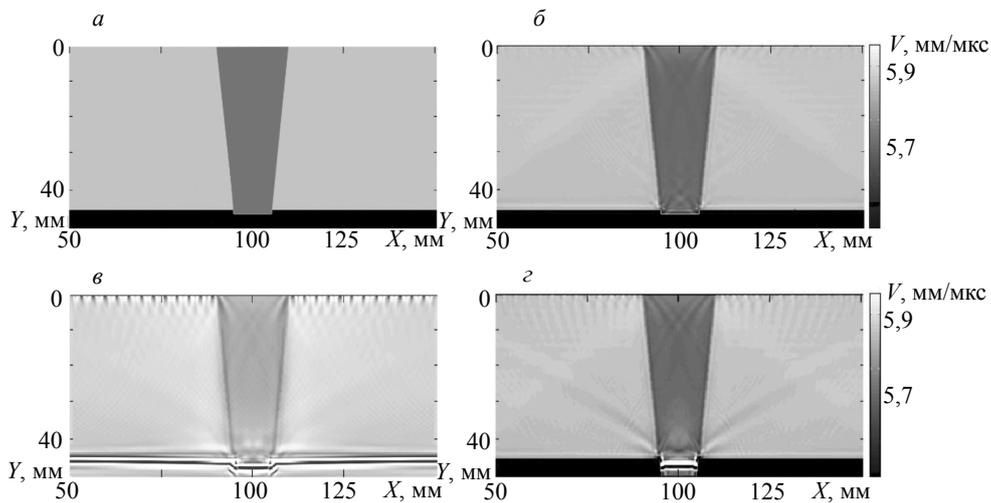


Рис. 2. Численное моделирование: исходное распределение скорости звука (*a*); изображение, реконструированное в случае известной нижней границы (*б*); изображение, реконструированное в случае неизвестного положения нижней границы (*в*); изображение, восстановленное в случае частично известной нижней границы (*г*).

константа $v_0 = 5,9$ мм/мкс. В области 5 скорость полагалась $v_1 = 1,5$ мм/мкс и не менялась на итерациях. Видно, что значения скорости продольной волны в сварном соединении (область 3) в среднем восстановлено правильно и составило около 5,7 мм/мкс, небольшие (около 2 %) по размеру флуктуации скорости заметны в нижней части.

На рис. 2в приведены результаты решение обратной задачи в постановке, когда положение отражающей границы 4 неизвестно. Начальное приближение функции скорости для итерационного решения в этом случае выбиралось $v_0 = 5,9$ мм/мкс во всей расчетной области. Узкая осциллирующая полоса в нижней части рисунка соответствует восстановленной границе 4. Видно, что качество реконструкции поля скоростей области 3 стало хуже. Хотя очертания области 3 восстановились, однако значение скорости в области 3 составило в среднем около 5,8 мм/мкс, что сильно отличается от модельного значения 5,7 мм/мкс. Это связано с тем, что восстановленная граница 4 в центральной части в целом смещена вниз на 0,6 мм от своего реального положения в образце. Скорость в области 5 полагалась известной.

Используя априорную информацию о том, что толщина областей 1 и 2 известна, решим обратную задачу в предположении, что положение границы 4 известно частично, только между областью 5 и областями 1, 2. В статье [37] был предложен безэталонный метод определения толщины объекта с плоскопараллельными границами и скорости продольной волны в нем по эхосигналам, измеренным антенной решеткой. Форма сварного соединения (область 3) неизвестна. Начальное приближение функции скорости для итерационного процесса решения обратной задачи в этом случае выбиралось следующее. В областях 1, 2, 3 полагалось $v_0 = 5,9$ мм/мкс, а в области 5 на каждой итерации полагалось $v_1 = 1,5$ мм/мкс. Начальное приближение поля скоростей приведено на рис. 3. На рис. 2г приведены результаты решения обратной задачи в постановке, когда положение нижней границы области 3 неизвестно. Видно, что качество реконструкции скоростного разреза области 3 стало заметно лучше. Остались артефакты вблизи участка с неизвестным положением границы 4. Однако отчетливо видно, что под областью 3 реконструированная граница имеет выступ вниз по вертикали. Максимум осциллирующей полосы в области границы 4 совпадает с реальным положением границы с точностью размера 1 пикселя около 0,2 мм.

На рис. 4б представлены результаты решения обратной задачи для образца с вогнутостью корня шва (утяжина), показанного на рис. 4а. В отличие от модельного образца, на рис. 2а под областью 3 граница 4 имеет смещение не вниз, а вверх размером 1,5 мм по вертикали. Обратная задача решалась в постановке, когда положение отражающей границы 4 известно частично, то есть неизвестно положение границы только под областью 3. На рис. 4б хорошо видно, что в отличие от рис. 2г, под областью 3 реконструированная граница имеет смещение вверх по вертикали. Начальное приближение при решении обратной задачи в этом случае, так же как и при реконструкции изображения, приведенного на рис. 2г, было выбрано как на рис. 3.

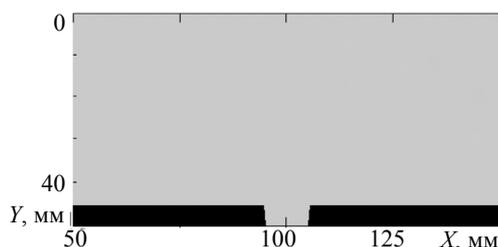


Рис. 3. Начальное приближение в случае, когда положение границы 4 частично известно. В области серого цвета скорость равна 5,9 мм/мкс, а в области черного цвета равна 1,5 мм/мкс.

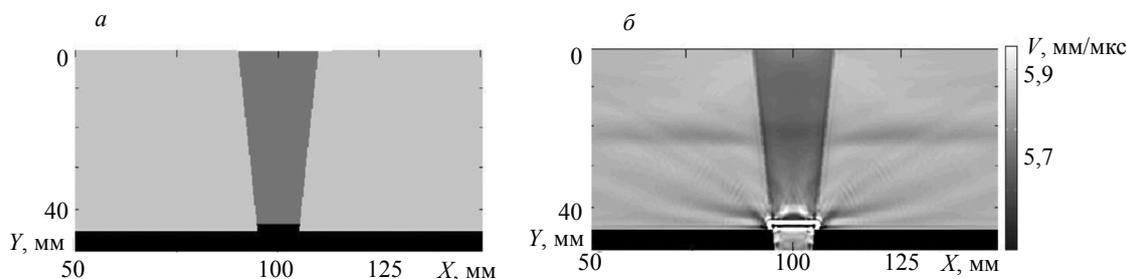


Рис. 4. Численное моделирование: исходное поле скоростей образца (а); поле скоростей восстановленное, как и на рис. 2г, в случае частично известной нижней границы (б).

3.1.2. Две антенные решетки со 100 элементами при наличии валика усиления

В практике ультразвукового контроля сварных соединений нередко возникает ситуация, когда трудно или невозможно расположить источники и приемники непосредственно над сварным соединением, например, при наличии валика усиления. В этом случае схема эксперимента выглядит как на рис. 5, на котором, в отличие от схемы на рис. 1, отсутствуют источники и приемники над областью 3. В эксперименте каждый пятый элемент антенных решеток слева и справа от области 3 последовательно излучает зондирующие импульсы, при этом все элементы обеих антенных решеток регистрируют эхосигналы. Модельные расчеты показали, что использование всех элементов антенных решеток в качестве источников не улучшает реконструированное поле скоростей, однако объем вычислений возрастает в 5 раз.

Скорость распространения звука в областях 1 и 2 составляла $v_0 = 5,9$ мм/мкс, скорость распространения звука в области 3 — 5,78 мм/мкс и отличается от v_0 примерно на 2 % (рис. 6а). Скорость распространения звука в круглой вставке диаметром 7,7 мм равна 6,2 мм/мкс. Положение нижней границы 4 предполагается 45 мм. Расчетная область представляет собой объединение областей 1, 2 и 3. Размер расчетной области составляет 260×45 мм, размер разностной сетки — 1020×175 точек. Обе антенные решетки с рабочей частотой 2,25 МГц содержат по 100 элементов с шагом 1,2 мм.

На рис. 6б показано восстановленное поле скоростей в области сварки в схеме эксперимента, изображенной на рис. 5. Качество восстановленного скоростного разреза в этой схеме эксперимента невысокое. Изображение содержит артефакты, возникающие из-за неполноты углового диапазона зондирования, поскольку не регистрируются эхосигналы, распространяющиеся по вертикальным траекториям. Однако по изображению на рис. 6б можно с точностью до пиксела восстановить форму правой и левой границы области 3.

Будем считать, что имеется полная информация об областях основного металла, то есть известна скорость звука и геометрия областей 1 и 2 (см. рис. 5). Известна геометрия сварного соединения (область 3), то есть известно положение правой и левой границы области 3, но неизвестна скорость звука в области 3. Эти предположения использовались при реконструкции изображения, приведенного на рис. 6в. Из рис. 6в видно, что качество восстановленного поля скоростей повысилось по сравнению с рис. 6б. Скорость в областях 1 и 2 равна 5,9 мм/мкс и предполагалась постоянной на каждой итерации. Скорость в области 3 варьирует около правильного значения 5,78 мм/мкс,

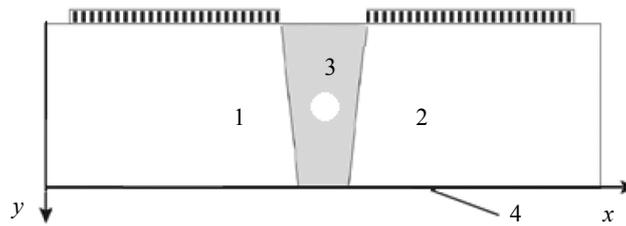


Рис. 5. Схема томографического эксперимента в случае неполных данных на верхней поверхности.

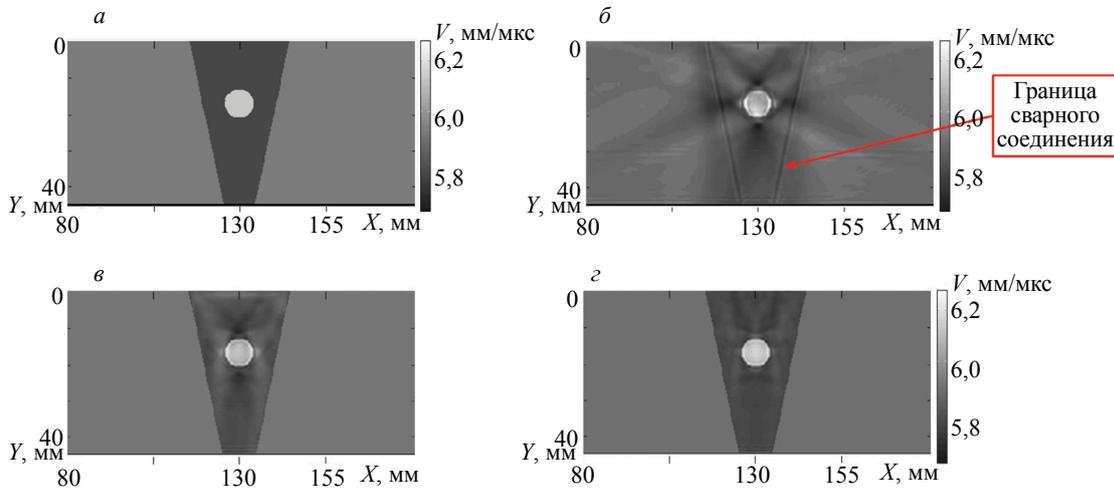


Рис. 6. Численное моделирование: исходное поле скоростей в образце (а); изображение получено в схеме эксперимента на рис. 6а (б); изображение получено при наличии полной информации об областях 1 и 2 (в); изображение получено с одним дополнительным источником над областью 3 (г).

причем величина варьирования не превышает 0,05 мм/мкс. Более того, достаточно добавить к схеме эксперимента, изображенного на рис. 5, один дополнительный источник над областью 3, как качество реконструкции становится еще выше (см. рис. 6г). Отметим, что в практике ультразвукового контроля можно использовать локальную иммерсионную ванну, которая позволяет размещать антенную решетку над валиком усиления [38]. Но численные эксперименты с таким способом регистрации эхосигналов потребуют нового цикла моделирования.

3.2. Два варианта сканирования антенными решетками с 20 элементами

Использование антенной решетки с числом элементов более 128 в настоящий момент времени достаточно затруднительно, так как наиболее популярные ЦФА-дефектоскопы имеют 32 или 64 канала излучения и измерения эхосигналов. Поэтому были рассмотрены схемы проведения регистрации эхосигналов двумя сканирующими антенными решетками с 20 элементами с рабочей частотой 2,25 МГц.

В первой схеме эксперимента, изображенной на рис. 7, две одинаковые линейные антенные решетки А и В размещены на верхней границе объекта контроля на фиксированном расстоянии друг от друга, равном 84 мм. Сначала каждый пятый элемент решеток А и В последовательно излучает зондирующие импульсы, при этом все элементы решеток А и В регистрируют эхосигналы. Затем решетки А и В синхронно смещаются вправо на расстояние Δx_w , равное размерам антенной решетки вдоль оси x , и процесс регистрации эхосигналов повторяется. За 6 шагов Δx_w антенная решетка А достигает области 2 и изменения прекращаются. Такая схема регистрации эхосигналов называется тройным сканированием [1]. Она применяется при проведении контроля антенными решетками с малым числом элементов с целью увеличения размеров области сканирования для повышения разрешающей способности изображения и для уменьшения уровня шума.

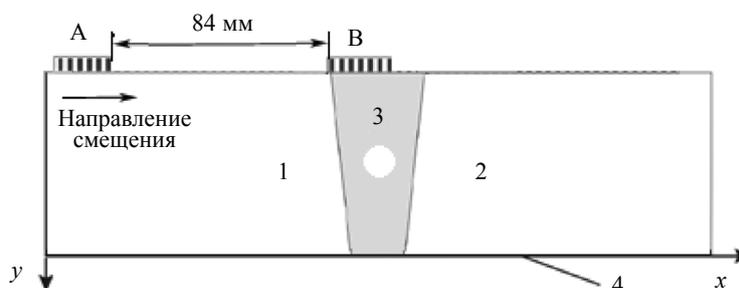


Рис. 7. Регистрация эхосигналов в режиме тройного сканирования.

Использование такой схемы регистрации эхосигналов увеличивает набор углов зондирования объекта контроля, что повышает качество восстановления его поля скоростей. Однако для реализации режима тройного сканирования требуется более сложная система сканирования с двумя двигателями для синхронного перемещения антенных решеток не только вдоль сварного соединения, но и поперек его (вдоль оси x). Понятно, что сканирование по двум координатам увеличивает время регистрации эхосигналов, но для восстановления изображения использовалось всего 3 120 эхосигналов.

Во второй схеме эксперимента две антенные решетки А и В также перемещаются по верхней границе образца, однако расстояние между решетками может изменяться. Измерения эхосигналов по такой схеме требует еще более сложной системы сканирования с тремя двигателями для независимого перемещения антенных решеток А и В поперек сварного соединения. При таком режиме сканирования в начальном положении антенные решетки А и В размещаются как в первой схеме эксперимента. Антенная решетка А фиксируется, а антенная решетка В перемещается 6 раз вправо со сдвигом Δx_w , равным размерам антенной решетки вдоль оси x . Затем антенная решетка А перемещается на Δx_w вправо, а антенная решетка В снова перемещается 6 раз вправо с шагом Δx_w , начиная от границы областей 1 и 3. Такой способ измерения эхосигналов предполагает уже 36 измерений двумя антенными решетками А и В при их независимом сканировании вдоль оси x . Эта схема регистрации эхосигналов фактически еще ближе, чем режим тройного сканирования, к схеме регистрации, изображенной на рис. 1, когда одна неподвижная антенная решетка А из 150 элементов располагается на верхней границе образца, но требует значительно больше времени для регистрации эхосигналов и сложную систему сканирования с тремя двигателями. Для восстановления изображения использовалось уже 18 720 эхосигналов. В численных расчетах использовались те же значения параметров и тот же образец, что и в разделе 3.1.1.

Как и прежде, для удобства восприятия на рисунках будем приводить только фрагмент центральной части реконструированного изображения. На рис. 8а показано восстановленное поле скоростей при регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования. Хотя поле скоростей внутри сварного соединения удалось восстановить, но оно содержит артефакты, возникающие из-за неполноты углового диапазона зондирования. Можно видеть вытянутые шлейфы, идущие влево и вправо от круглой вставки. Углы, под которыми шлейфы идут от круглой вставки, при-

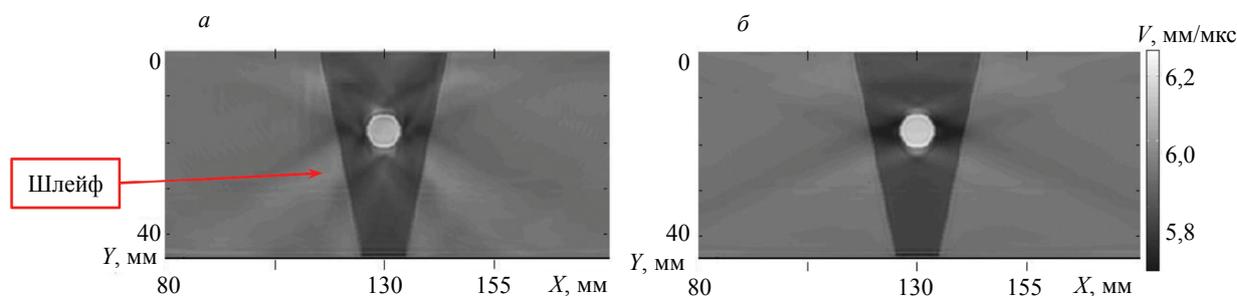


Рис. 8. Численное моделирование: изображение, реконструированное в схеме эксперимента по первому варианту (тройное сканирование) (а); изображение, реконструированное в схеме эксперимента по второму варианту (б).

мерно совпадают с углами, под которыми зондирующие импульсы от антенной решетки А проходят через круглую вставку, отражаются от дна и принимаются элементами антенной решетки В. На рис. 8б показано поле скоростей, восстановленное по эхосигналам, измеренным по второму варианту эксперимента. Качество восстановленного изображения в этой схеме эксперимента выше, чем на рис. 8а, так как для реконструкции использовалось гораздо больше углов зондирования, чем для рис. 8а. Скорость в круглой вставке на рис. 8б можно оценить как 6,2 мм/мкс, а на рис. 8а — как 6,1 мм/мкс. Отклонение определенной скорости продольной волны в области шлейфа от исходного на рис. 8а в среднем равно 0,05 мм/мкс, а на рис. 8б в среднем равно 0,03 мм/мкс.

4. ВЫВОДЫ

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

1. Численное моделирование показало возможность восстановить поле скоростей и форму сварного соединения при регистрации эхосигналов антенной решеткой в зеркально-теневом режиме.

2. Результаты численных экспериментов для различных схем регистрации эхосигналов позволяют провести оптимизацию томографических схем для разных прикладных задач.

3. Показано, что в случае, когда положение дна образца известно полностью, то качество реконструкции поля скоростей достаточно высокое — ошибка не превышает 0,03—0,05 мм/мкс. Если положение отражающего дна неизвестно, удается восстановить форму дна объекта контроля, но ошибки определения скорости продольной волны значительны и составляют около 0,1 мм/мкс. Перспективным представляется использование априорной информации о толщине основного металла и скорости звука в нем, в этом случае удастся определить размер провисания или утяжины.

4. Проведено сравнение результатов решения обратной задачи для двух схем модельного эксперимента с двумя сканирующими антенными решетками с малым числом элементов. Качество реконструкции поля скоростей при регистрации эхосигналов двумя независимо сканирующими антенными решетками близко к качеству изображения, восстановленному при использовании антенной решетки с 150 элементами. Однако для ее реализации нужно использовать сложное сканирующее устройство с тремя двигателями, что значительно увеличивает время эксперимента и примерно в три раза увеличивает объем данных у измеряемых эхосигналов.

5. Показано, что при наличии валика усиления, когда над сварным соединением невозможно разместить источники излучения, тем не менее удастся с точностью 0,05 мм/мкс восстановить в сварном соединении поле скоростей звука и его форму.

В статье расчеты проводились на CPU-разделе суперкомпьютера «Ломоносов-2» МГУ [39] с использованием около 50 вычислительных ядер CPU. Для каждого решения обратной задачи количество итераций составило около 100—150, время расчета составило около 0,5—1 ч.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики по соглашению № 075–15–2019–1621. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—74.

2. Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. The Wavenumber Algorithm for Full-Matrix Imaging Using and Ultrasonic Array // NDT Int. 2006. V. 39. No. 7. P. 525—541.

3. 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.

4. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решеткой // Контроль. Диагностика. 2011. № 10. С. 63—70.

5. Deleye X., Hörchens L., Chougrani K. Experimental comparison of wave-field based ultrasonic imaging with other advanced ultrasonic weld inspection techniques / 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16—20 April 2012. Durban. South Africa.

6. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.

7. *Blitz J., Simpson G.* Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing. London: Springer, 1995. 264 p.
8. *Langenberg K.-J., Marklein R., Mayer K.* Ultrasonic Nondestructive Testing. Boca Raton: CRC Press, 2012. 772 p.
9. *Качанов В.К., Соколов И.В., Тимофеев Д.В., Туркин М.В., Шалимова Е.В.* Обнаружение отражающих плоскостей при ультразвуковой томографии строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2010. № 5. С. 36—44.
10. *Кошевой В.В., Кривин Е.В., Муравьев А.М., Романишин И.М.* Особенности ультразвуковой томографии толстостенных изделий // Дефектоскопия. 2004. № 7. С. 3—16.
11. *Базулин Е.Г., Садыков М.С.* Определение скорости продольной ультразвуковой волны в изотропном однородном сварном соединении по эхосигналам, измеренным двумя антенными решетками // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 3—15.
12. *Bellis C., Bonnet M.* Crack identification by 3D time-domain elastic or acoustic topological sensitivity // C.R. Mecanique. 2009. V. 337. № 3. P. 124—130.
13. *Lubeigt E., Mensah S., Rakotonarivo S., Chaix J-F., Baquè F., Gobillot G.* Topological imaging in bounded elastic media // Ultrasonics. 2017. V. 76. P. 145—153.
14. *Dominguez N., Gibiat V.* Non-destructive imaging using the time domain topological energy // Ultrasonics. 2010. V. 50. № 3. P. 367—372.
15. *Rodriguez S., Deschamps M., Castaings M., Ducasse E.* Guided wave topological imaging of isotropic plates // Ultrasonics. 2014. V. 54. № 7. P. 1880—1890.
16. *Metwally K., Lubeigt E., Rakotonarivo S., Chaix J.F., Baquè F., Gobillot G., Mensah S.* Weld inspection by focused adjoint method // Ultrasonics. 2018. V. 83. P. 80—87.
17. *Bachmann E., Jacob X., Rodriguez S., Gibiat V.* Three-dimensional and real-time two-dimensional topological imaging using parallel computing // The Journal of the Acoustical Society of America. 2015. V. 138. № 3. P. 1796.
18. *Kocur G.K., Saenger E.H., Grosse C.U., Vogel T.* Time reverse modeling of acoustic emissions in a reinforced concrete beam // Ultrasonics. 2016. V. 65. P. 96—104.
19. *Virieux J., Operto S.* An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Geophysics. 2009. V. 74. № 6. P. WCC1 — WCC26.
20. *Vinard N., Martiartu N.K., Boehm C., Balic I.J., Fichtner A.* Optimized transducer configuration for ultrasound waveform tomography in breast cancer detection / In: N. Duric, B.C. Byram (eds.). Medical Imaging 2018: Ultrasonic Imaging and Tomography. Proc. SPIE. 2018. V. 10580. P. 1058001.
21. *Klibanov M.V., Kolesov A.E., Nguyen D.-L.* Convexification method for an inverse scattering problem and its performance for experimental backscatter data for buried targets // SIAM J. Imaging Sci. 2019. V. 12. P. 576—603.
22. *Goncharsky A.V., Romanov S.Y.* Iterative methods for solving coefficient inverse problems of wave tomography in models with attenuation // Inverse Problems. 2017. V. 33. № 2. P. 025003.
23. *Seidl R., Rank E.* Iterative time reversal based flaw identification // Computers & Mathematics with Applications. 2016. V. 72. № 4. P. 879—892.
24. *Marty P., Boehm C., Fichtner A.* Acoustoelastic full-waveform inversion for transcranial ultrasound computed tomography / In: B.C. Byram, N.V. Ruitter (eds.). Medical Imaging 2021: Ultrasonic Imaging and Tomography. Proc. SPIE. 2021. V. 11602. P. 1160211.
25. *Pérez-Liva M., Herraiz J.L., Udías J.M., Miller E., Cox B.T., Treeby B.E.* Time domain reconstruction of sound speed and attenuation in ultrasound computed tomography using full wave inversion // The Journal of the Acoustical Society of America. 2017. V. 141. No. 3. P. 1595—1604.
26. *Rao J., Ratssepp M., Fan Z.* Guided Wave Tomography Based on Full Waveform Inversion // IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2016. V. 63. № 5. P. 737—745.
27. *Bazulin E.G., Goncharsky A.V.* Inverse Problems of Ultrasonic Tomography in Nondestructive Testing: Mathematical Methods and Experiment // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 6. P. 453—462. [Базулин Е.Г., Гончарский А.В., Романов С.Ю., Серезжников С.Ю. Обратные задачи ультразвуковой томографии в неразрушающем контроле: математические методы и эксперимент // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 30—39. DOI: 10.1134/S0130308219060046]
28. *Bazulin E.G., Goncharsky A.V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y.* Parallel CPU- and GPU-algorithms for inverse problems in nondestructive testing // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2018. V. 39. № 4. P. 486—493. <https://doi.org/10.1134/S1995080218040030>
29. *Juengert A., Dugan S., Homann T., Mitzscherling S., Prager J., Pudovikov S., Schwender T.* Advanced ultrasonic techniques for nondestructive testing of austenitic and dissimilar welds in nuclear facilities // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 1949. P. 110002. <https://doi.org/10.1063/1.5031581>
30. *Chassignole B., Villard D., Dubuget M., Baboux J.C., El Guerjouma R.* Characterization of austenitic stainless steel welds for ultrasonic NDT // AIP Conference Proceedings. 2000. V. 509. P. 1325—1332. <https://doi.org/10.1063/1.1307835>
31. *Romanov S.Y.* Supercomputer simulations of ultrasound tomography problems of flat objects // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. V. 41. No 8. P. 1563—1570. DOI: 10.1134/S199508022008017X

32. Ильгамов М.А., Гильманов А.Н. Неотражающие условия на границах расчетной области. М.: Физматлит, 2003.
33. Engquist B., Majda A. Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves // *Math. Comput.* 1977. V. 31. P. 629—651.
34. Goncharsky A.V., Romanov S.Y. A method of solving the coefficient inverse problems of wave tomography. // *Computers and Mathematics with Applications*. 2019. V. 77. P. 967—980. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2018.10.033>
35. Natterer F. Possibilities and limitations of time domain wave equation imaging / In: *Contemporary Mathematics*. Providence: American Mathematical Society, 2011. V. 559. P. 151—162. <https://doi.org/10.1090/conm/559>
36. Klibanov M.V., Kolesov A.E. Convexification of a 3-D coefficient inverse scattering problem // *Computers & Mathematics with Applications*. 2019. V. 77. No 6. P. 1681—1702.
37. Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh. Reference-Free Method for Thickness Gaging of a Test Object and Measuring the Speed of Longitudinal and Transverse Waves in It Based on Echo Signals Picked by an Antenna Array // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. No. 6. P. 463—475. [Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. Безэталонный метод измерения толщины объекта контроля и скорости продольной и поперечной волны в нем по эхосигналам, измеренным антенной решеткой // *Дефектоскопия*. 2019. № 6. С. 40—52.]
38. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Применение антенных решеток и кремнийорганического полимера в качестве иммерсионной среды для проведения ультразвукового контроля объектов с неровной поверхностью // *Дефектоскопия*. 2014. № 7. С. 3—11.
39. Voevodin Vl., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: large scale, deep monitoring and fine analytics for the user community // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2019. V. 6. No 2. P. 4—11. DOI:10.14529/jsfi190201
-

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЭХОСИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ ЗА СЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОРЕЖИВАНИЯ КОММУТАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

© 2021 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, Л.В. Медведев²

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8,
Технопарк «Строгино»

²Московский Энергетический Институт (Национальный исследовательский университет),
Россия 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 03.09.2021; после доработки 11.10.2021

Принята к публикации 11.10.2021

Для повышения скорости регистрации эхосигналов и повышения скорости восстановления изображения отражателей предложено использовать прореженную коммутационную матрицу (SMC). Для получения коммутационной матрицы, позволяющей получать изображения минимально отличающиеся от изображения, полученного по полной коммутационной матрице (FMC), предложено использовать генетический алгоритм. Рассмотрено два варианта оптимизации коммутационной матрицы: поэлементное прореживание и прореживание по столбцам. В численном и модельных экспериментах показано, что определенная с помощью генетического алгоритма прореженная коммутационная матрица, заполненная на 25 %, позволяет сформировать изображения, отличающиеся от изображения, полученного по FMC, с ошибкой около 3 %. Работа с коммутационной матрицей по столбцам позволяет повысить скорость регистрации эхосигналов в 4 раза. Во столько же раз повышается скорость восстановления изображения.

Ключевые слова: антенная решетка, коммутационная матрица, двойное сканирование, Full Matrix Capture (FMC), Sparse Matrix Capture (SMC), тройное сканирование, C-SAFT, Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка антенной решеткой (ЦФА), генетический алгоритм (ГА).

DOI: 10.31857/S0130308221110026

1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из практических задач ультразвукового контроля — это уменьшение интервала времени от начала регистрации эхосигналов до выдачи заключения. Поэтому повышение скорости регистрации эхосигналов антенной решеткой, уменьшение их объема и времени восстановления изображения отражателей являются актуальными задачами.

Применение метода цифровой фокусировки антенной решеткой (ЦФА) предполагает излучение зондирующего сигнала и регистрацию эхосигналов всеми парами антенной решетки (АР). Матрицу, в которой единицами отмечены активные пары «излучатель—приемник», будем называть коммутационной. Набор эхосигналов, при излучении одним элементом АР и принятый всеми элементами АР, будем называть выстрелом. При использовании 32-элементной АР нужно излучить 32 раза зондирующий сигнал и каждый раз измерить 32 выстрела, то есть залп, состоящий из 1024 эхосигналов (100 % заполнение коммутационной матрицы единицами). Для 64-элементной АР на регистрацию 4096 эхосигналов нужно уже 64 такта на излучение. Работа в режиме ЦФА-Х, когда изображение формируется по эхосигналам, измеренным в нескольких положениях АР, делает проблему еще более актуальной.

Для повышения скорости регистрации эхосигналов разработаны разные методы. Например, метод Plane Wave Imaging (PWI) [1], позволяющий получать изображения отражателей при излучении порядка 10 плоских волн в объект контроля (ОК). Это повышает скорость регистрации примерно в три раза для 32-элементной АР, работающей в режиме ЦФА. Один из недостатков метода PWI заключается в том, что с его помощью можно получить качественное изображение в ограниченном объеме ОК. Метод Code Division Multiple Access (CDMA) позволяет одновременно излучать всеми элементами АР, каждому из которых приписан зондирующий импульс из ортогонального набора кодовых последовательностей [2], т.е. в идеальном случае эхосигналы можно измерить за один такт — в 32 раза быстрее, чем в режиме ЦФА. Однако для данного метода характерен достаточно большой межканальный шум после декодирования эхосигналов с помощью согласованной фильтрации из-за малой длины кодовых последовательностей. Существует ряд нелинейных методов, позволяющих получать высококачественные изображения по эхосигналам, измерен-

ным с нарушением теоремы Котельникова. К таким методам относятся метод максимальной энтропии [3] и метод распознавания со сжатием Compressive Sensing (CS) [4]. Нелинейные методы позволяют восстанавливать изображения отражателей со сверхразрешением по экосигналам нескольких выстрелов. Недостатком этих методов является достаточно большое время проведения расчетов.

Возникает простая мысль — проредить коммутационную матрицу. Такая матрица в зарубежной литературе называется Sparse Matrix Capture (SMC) [5]. Заполняя единицами только нижний или верхний треугольник коммутационной матрицы (Half Matrix Capture (HMC) [5]), можно примерно на 50 % уменьшить объем измеряемых экосигналов [6], но при этом не удастся увеличить скорость регистрации экосигналов, так как придется излучить зондирующий сигнал каждым элементом решетки. Случайное 25 % прореживание коммутационной матрицы приводит к заметному повышению шума изображения отражателей. Перебирая разные варианты случайной коммутационной матрицы можно выбрать вариант, минимально отличающийся от идеального изображения, полученного по 100 % коммутационной матрице. Но гарантии, что подобранная коммутационная матрица будет оптимальной, нет. С подобной проблемой сталкиваются и при управлении фазированными антенными матрицами (АМ) самолетов. Проблема в том, чтобы, используя меньше 50 % элементов фазированной АМ, получить максимально узкую диаграмму направленности при минимальном уровне ее боковых лепестков. Эта задача успешно решается при использовании генетического алгоритма (ГА) [7]. Применение ГА может позволить сформировать прореженную коммутационную матрицу, позволяющую получить ЦФА-изображение отражателей с минимальным увеличением шума [8].

2. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Генетический алгоритм (ГА) — это метод поиска глобального экстремума функции, основанный на принципе естественного отбора [9]. Процесс естественного отбора начинается с отбора наиболее приспособленных особей из популяции. Они производят потомство, которое наследует характеристики родителей и которое будет добавлено к следующему поколению. Если родители имеют лучшую физическую форму (функцию приспособляемости), то их потомство будет лучше, чем родители, и у него будет больше шансов выжить. Этот процесс повторяется итерационно до тех пор, пока не будет найдено поколение с наиболее приспособленными особями. ГА относится к классу методов направленного случайного поиска экстремумов функций и эффективнее, чем простой случайный поиск [10].

3. ИДЕЯ ПРИМЕНЕНИЯ

В нашем случае особь — это вариант прореженной коммутационной матрицы, нули и единицы которой рассматриваются как ее «ген». Функция, определяющая ее приспособляемость, — это отличие ЦФА-изображения, полученного с использованием прореженной коммутационной матрицы (SMC), от идеального ЦФА-изображения, восстановленного по полной коммутационной матрице (FMC). В качестве отличия (функции приспособляемости) можно рассматривать разные критерии: модуль максимальной разницы, среднеквадратичное отклонение, среднее значение изображения, дисперсия разницы двух изображений, размеры блика отражателя, уровень спеклового шума и прочее. Далее в расчетах использовалась функция приспособляемости в виде среднеквадратичной разницы между двумя изображениями.

На первом этапе определяется оптимальная прореженная коммутационная матрица. Для этого нужно рассчитать экосигналы от отражателей заданного типа, расположенных по всей области восстановления изображения (ОВИ), и восстановить идеальное ЦФА-изображение по полной коммутационной матрице. Тип антенной решетки, тип призмы, ее расположение относительно сварного соединения и размеры ОВИ определяются конкретной методикой контроля. Такой расчет проводится один раз. На втором этапе рассчитанная прореженная коммутационная матрица используется для регистрации экосигналов при проведении контроля.

Отметим, что ГА может работать в двух режимах: поэлементная оптимизация коммутационной матрицы, что дает больше возможностей для манипуляций с «генами», которых для 32-элементной решетки будет 1024, и оптимизация по выстрелам, каждому из которых в коммутационной матрице соответствует столбец. Во втором случае длина «гена» будет равна 32, но только в этом случае можно ускорить измерение экосигналов.

4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Расчет эхосигналов, рассеянных пятью точечными отражателями, проводился для одного положения АР (32 элемента, размер элемента 0,55 мм, зазор между их краями 0,05 мм, частота 5 МГц), работающей без призмы. Полагалось, что ультразвук распространяется в образце, изготовленном из стали Ст20. На рис. 1а показано идеальное изображение¹, восстановленное по полной коммутационной матрице, а на рис. 1б — изображение при использовании прореженной коммутационной матрицы, показанной на рис. 1г, полученной случайным прореживанием. Далее в разделе будем полагать, что коммутационная матрица прореживается до 25 %, то есть в коммутационной матрице содержится 256 единиц, в результате чего будет измерено не 1024, а 256 эхосигналов. На рис. 1в показан модуль разницы между двумя изображениями. Среднеквадратичное отклонение между ними равно 1,92, а модуль максимальной разницы равен 9,2 %. Изображение, полученное по прореженной коммутационной матрице, по сравнению с идеальным изображением имеет более высокий уровень фоновых шумов, в котором имеются ложные блики, и конечно оно является более сложным для анализа оператором.

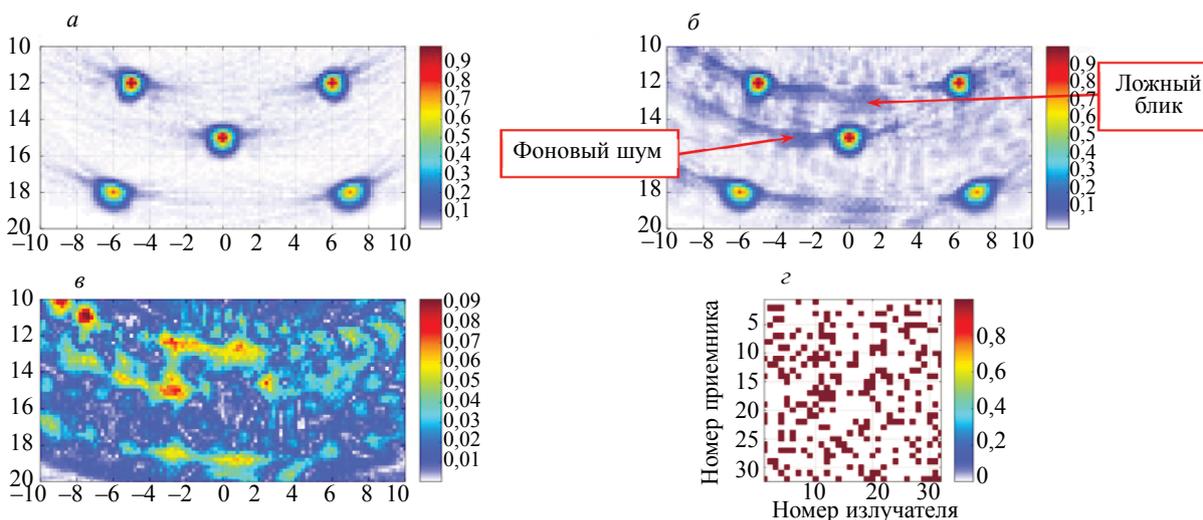


Рис. 1. Случайное прореживание коммутационной матрицы: а — идеальное ЦФА-изображение; б — ЦФА-изображение, восстановленное по прореженной коммутационной матрице; в — модуль разницы двух изображений; г — прореженная коммутационная матрица.

Перебрав 200 вариантов случайного заполнения коммутационной матрицы, удалось получить изображение со среднеквадратичным отклонением от идеального равным 1,51 (рис. 2а), что лучше, чем у изображения на рис. 1б. Вновь полученное изображение более высокого качества, так как отличие от идеального изображения уменьшилось с 9,22 до 7,5 %. Увеличивая количество случайных вариантов коммутационной матрицы до 2 000, можно получить изображение еще ближе к идеальному. Но такой подбор носит исключительно случайный характер и не гарантирует получения оптимального результата даже при случайном переборе 20 000 или 200 000 вариантов коммутационной матрицы. Формирование коммутационной матрицы с помощью ГА позволяет оптимизировать расположение элементов для ее 25 % заполнения с более высокой вероятностью. На рис. 2б показано восстановленное изображение, которое приближено по качеству к изображению на рис. 1а, полученному по полной коммутационной матрице. Среднеквадратичное отклонение от идеального изображения уменьшилось практически на 9 дБ — с 1,51 до 0,58, а максимальное отклонение уменьшилось с 7,5 до 3,3 %, то есть на 7 дБ. Формирование коммутационной матрицы по выстрелам с помощью ГА позволяет получить изображение (рис. 2в) несколько худшего качества, чем на рис. 2б: среднеквадратичное отклонение с 0,58 возросло до 0,75, а максимальное отклонение возросло с 3,3 до 4,6 %. Но незначительное ухудшение качества изображения порядка

¹Использование цвета для пояснения рисунков доступно только в электронном варианте статьи или в ее печатном издании журнала «Дефектоскопия».

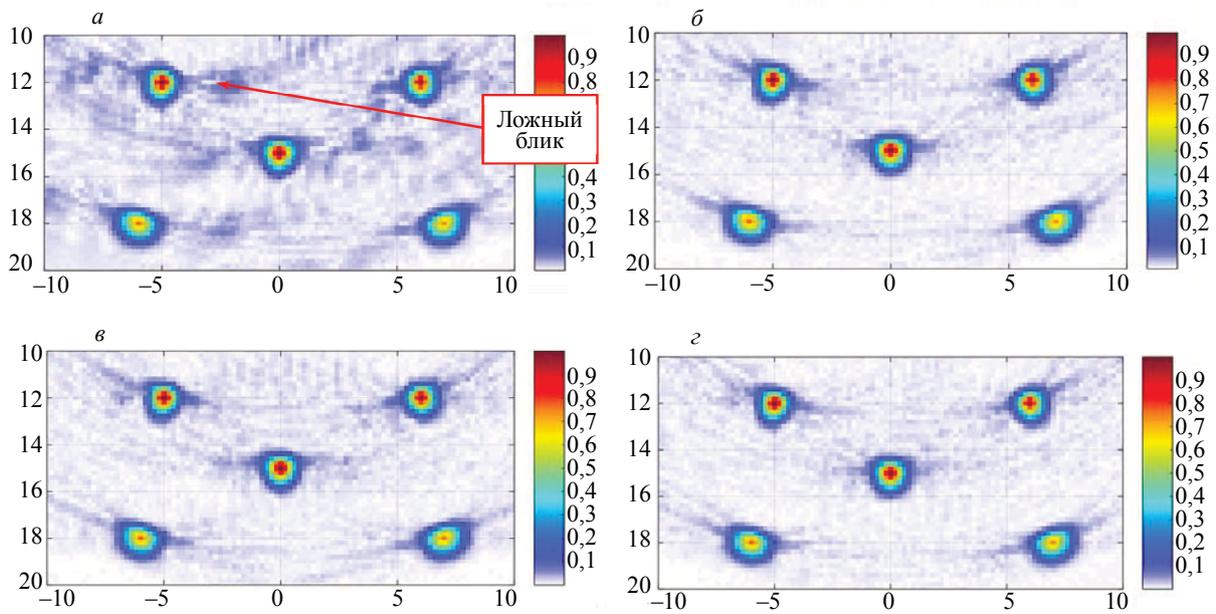


Рис. 2. ЦФА-изображение, полученное по прореженной коммутационной матрицы:

a — случайное прореживание; *б* — ГА полной матрицы; *в* — ГА матрицы по выстрелам; *г* — ГА полной матрицы в режиме миграции.

3 дБ позволяет в четыре раза повысить скорость регистрации эхосигналов. Работа с ГА в режиме миграции, когда создаются несколько подмножеств коммутационных матриц (субпопуляций особей), которые по прошествии заданного количества итераций обмениваются «генами» лучших вариантов коммутационных матриц, повышает вероятность попасть в глобальный минимум функции приспособляемости (рис. 2г). Среднеквадратичное отклонение уменьшилось до 0,539 (на 0,7 дБ меньше, чем на рис. 2б), а максимальное отклонение уменьшилось до 2,83 % (на 1,3 дБ меньше, чем рис. 2б). Разница между изображениями на рис. 2б и 2г незначительная.

При анализе изображения оператором очень важным аспектом является выбор палитры, так как некоторые цветные палитры неявно проводят операцию отсечки изображения. На рис. 3а в черно-белой палитре показано идеальное ЦФА-изображение, а на рис. 3б — изображение по прореженной коммутационной матрице. Изображения визуально отличаются незначительно, хотя максимальная разница между изображениями достигает 4,8 %.

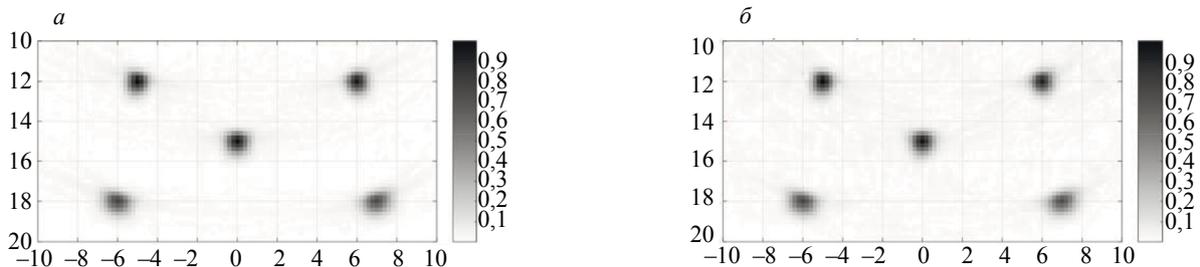


Рис. 3. ЦФА-изображение, представленное в черно-белой палитре:

a — идеальное изображение; *б* — изображение по прореженной коммутационной матрице.

Также нужно учитывать, что оператор может работать с изображением отражателей, обработанным алгоритмами, повышающими качество изображения. Это может быть операция сглаживания, операция отсечки, применяемые для повышения отношения сигнал/шум. Возможна обработка изображения текстурным фильтром, например, адаптивным анизотропным диффузным фильтром (AADF) [11], который выделяет на изображении блики с самыми резкими границами и значительно уменьшает уровень фонового шума.

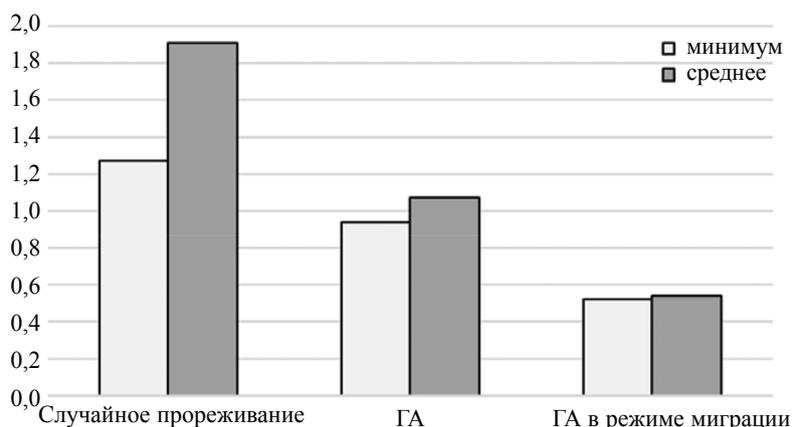


Рис. 4. Средние и лучшие решения, полученные при прореживании коммутационной матрицы.

Выбор функции пригодности очень ответственное дело и представляет собой отдельную тему для исследований. Важным моментом является и тот факт, что каждый элемент коммутационной матрицы может быть равен не только нулю или единице, как полагалось в данной статье, а может быть равным числу в интервале $[0, 1]$. При таком подходе можно дополнительно уменьшить уровень шума, но за счет некоторого ухудшения разрешающей способности изображения [12].

В качестве обобщения результатов, изложенных в этом разделе, на рис. 4 показаны средние (столбцы темно-серого цвета) и лучшие значения (столбцы светло-серого цвета) среднеквадратических отклонений между изображениями при прореживании коммутационной матрицы случайным образом (при использовании ГА) и при использовании ГА в режиме миграции). Лучший результат расчета коммутационной матрицы при случайном прореживании имеет среднеквадратичную ошибку на 7,4 дБ больше, чем в случае применения ГА в режиме миграции. Отметим, что при прореживании коммутационной матрицы по выстрелам в случае применения ГА в режиме миграции решение часто приходило в глобальный минимум, так как длина гена была равна всего 32.

5. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [13].

5.1. Образец Т-Б-39-60-Пл, режим ЦФА

Образец представляет собой плексигласовый параллелепипед толщиной 60 мм, в котором сделано шесть пронумерованных, как показано на рис. 5, боковых цилиндрических отверстий (БЦО) диаметром 1,5 мм. Эхосигналы регистрировались неподвижной АР (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента $0,55 \times 10$ мм, зазор между пьезоэлементами 0,05 мм).

На первом этапе прореживание коммутационной матрицы до 25 % с помощью ГА позволило получить изображение, отличающееся от идеального по критерию максимальной разницы всего на 1,6 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,21. Прореживание коммутационной матрицы до 16 выстрелов позволило восстановить изображение, отличающееся от идеального по критерию максимальной разницы всего на

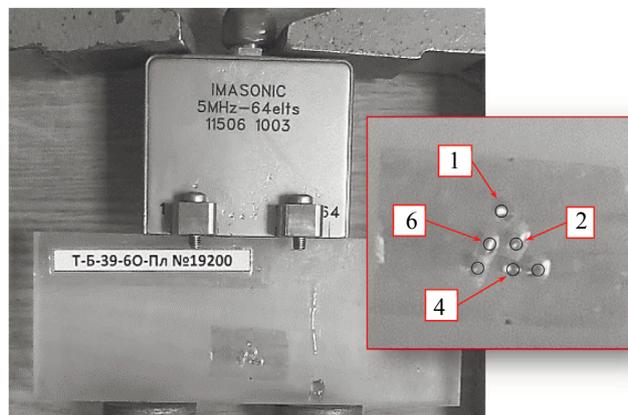


Рис. 5. Фотография образца и используемой АР.

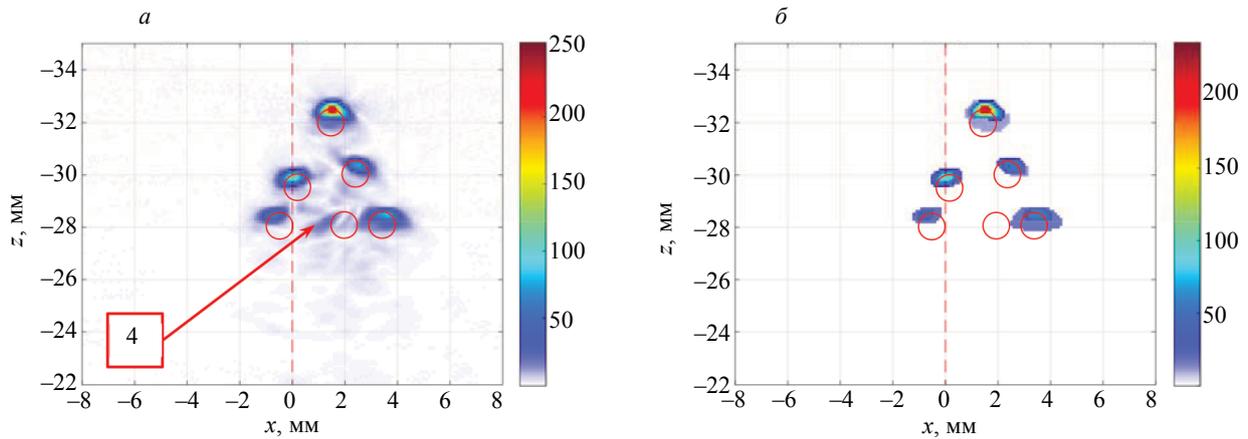


Рис. 6. Идеальное ЦФА-изображение (а) и результат его обработки AADF (б).

1,4 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,19. Пять точечных отражателей распределялись по углам и центру ОВИ, размеры которой можно оценить по рис. 6.

На рис. 6 показано идеальное ЦФА-изображение (а) и результат его обработки текстурным фильтром AADF (б). На обоих изображениях различимы пять из шести БЦО. Изображение границы БЦО № 4 восстановить не удалось, так как он затенен другими БЦО. На рис. 6 окружностями красного цвета показаны контуры шести БЦО.

На втором этапе рассчитанная прореженная коммутационная матрица использовалась для регистрации эхосигналов при проведении контроля. На рис. 7а показано ЦФА-изображение, восстановленное с использованием прореженной до 25 % коммутационной матрицы. Полученное ЦФА-изображение отличается от идеального по критерию максимальной разницы на 2,3 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,27. Уровень фонового шума ЦФА-изображения по сравнению с изображением на рис. 6а увеличился незначительно — меньше, чем на 2 дБ, и на нем также хорошо видны блики пяти БЦО. На рис. 7б представлено ЦФА-изображение, восстановленное с использованием прореженной до 16 выстрелов коммутационной матрицы. ЦФА-изображение отличается от идеального по критерию максимальной разницы на 1,9 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,21, что очень близко к разнице между изображениями, полученной при расчете коммутационной матрицы на первом этапе.

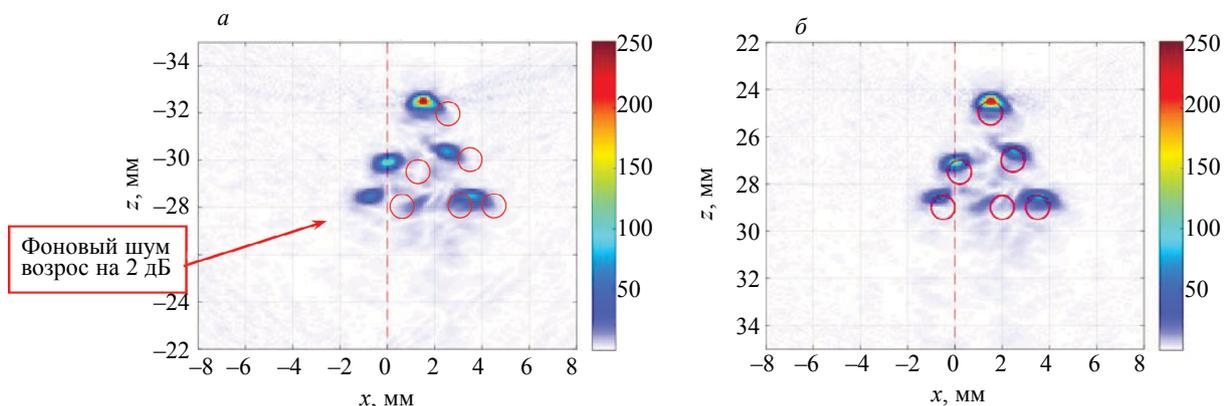


Рис. 7. ЦФА-изображение, восстановленное с использованием коммутационной матрицы, прореженной до 25 % (а), и коммутационной матрицы, прореженной до 16 выстрелов (б).

После обработки AADF изображений на рис. 7 блики границ БЦО по форме отличаются от представленных на рис. 6б буквально на несколько пикселей, а различие по амплитуде около 1 дБ. Можно предположить, что при работе с AADF-изображениями коммутационную матрицу можно проредить больше чем на 25 %, что позволит еще больше повысить скорость регистрации эхосигналов.

5.2. Образец СО-1, режим ЦФА-Х

Для регистрации в образце СО-1 эхосигналов в режиме ЦФА-Х в трех положениях с шагом 9,8 мм (апертура сканирования схематически показана на рис. 8 стрелкой красного цвета) использовалась АР (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,55 \times 10$ мм, зазор между пьезоэлементами 0,05 мм). Восстанавливались изображения БЦО с центрами на глубинах 25, 30 и 35 мм. ОВИ показана на рис. 8 четырехугольником с полупрозрачной заливкой красного цвета.

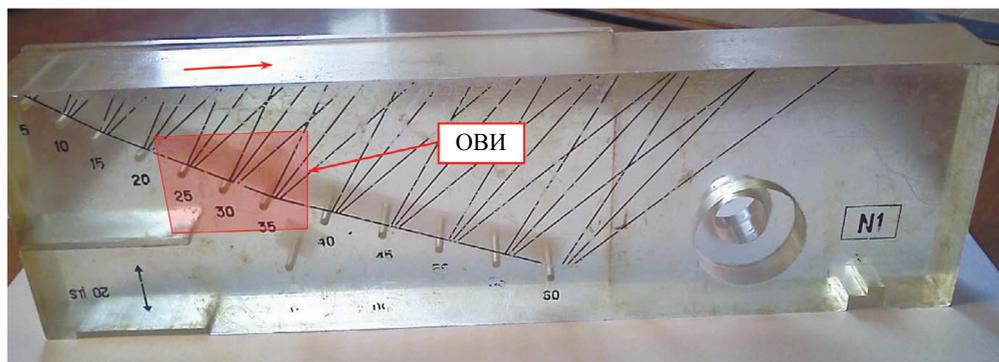


Рис. 8. Образец СО-1.

На первом этапе прореживание коммутационной матрицы до 25 % с помощью ГА для каждого положения АР позволило получить изображение, отличающееся от идеального по критерию максимальной разницы на 3,4 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,79. Прореживание коммутационной матрицы до 8 выстрелов для каждого положения АР позволило получить изображение, отличающееся от идеального по критерию максимальной разницы на 3,5 % и по среднеквадратичному отклонению на 1,1. Восемь точечных отражателей распределялись по всей ОВИ, размеры которой можно оценить по рис. 9.

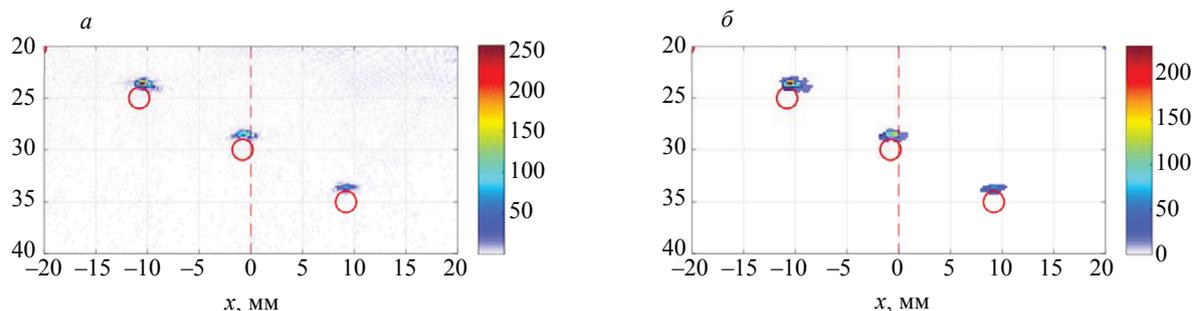


Рис. 9. Идеальное ЦФА-Х-изображение (а) и результат его обработки AADF (б).

На рис. 9 показано идеальное ЦФА-Х-изображение (а) и результат его обработки AADF (б). На изображениях окружностями красного цвета показаны контуры трех БЦО.

На втором этапе рассчитанные прореженные коммутационные матрицы для каждого положения АР использовались для проведения контроля. На рис. 10а показано ЦФА-Х-изображение, восстановленное с использованием прореженной до 25 % коммутационной матрицы. ЦФА-Х-изображение отличается от идеального по критерию максимальной разницы на 6,3 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,79. Уровень фонового шума ЦФА-Х-изображения по сравнению с изображением на рис. 9а увеличился незначительно — в среднем на 2 дБ, и на изображении также хорошо видны блики 3 БЦО. Так как шаг между элементами АР равен 1 мм, то прореживание коммутационной матрицы привело к повышению шума (отмечен выноской «Шум грубого шага АР»), связанного с нарушением теоремы Котельникова. У АР, используемой в разделе 5.1,

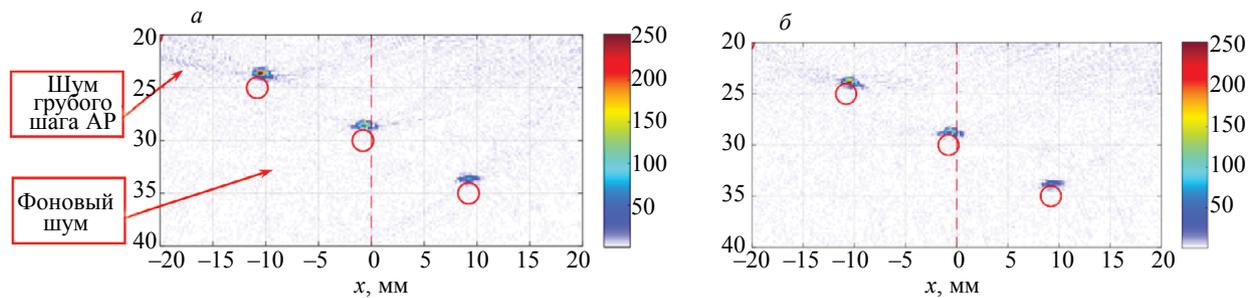


Рис. 10. ЦФА-Х-изображение, восстановленное с использованием коммутационной матрицы, прореженной до 25 % (а), и коммутационной матрицы, прореженной до 8 выстрелов (б).

шаг между элементами равен 0,6 мм и шум этой природы не так заметен. На рис. 10б представлено ЦФА-Х-изображение, восстановленное с использованием прореженной до 8 выстрелов коммутационной матрицы для каждого положения АР. Восстановленное ЦФА-Х-изображение отличается от идеального по критерию максимальной разницы на 6,4 % и по среднеквадратичному отклонению на 0,73.

Блики границы БЦО на AADF-изображениях, полученных при обработке изображений на рис. 10, по форме отличаются от бликов на рис. 9б буквально на несколько пикселей, а амплитуды отличаются примерно на 1 дБ. По этой причине эти AADF-изображения в статье не представлены.

Отметим еще раз, что прореживание коммутационной матрицы по выстрелам позволяет не только в 4 раза уменьшить объем измененных эхосигналов, но и в 4 раза повысить скорость регистрации эхосигналов.

6. ВЫВОДЫ

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

Прореживание коммутационной матрицы с помощью ГА позволяет уменьшить шум изображения на 3—6 дБ по сравнению с изображением, полученным при случайном прореживании коммутационной матрицы (см. рис. 4).

Использование ГА для прореживания коммутационной матрицы до 25 % позволяет уменьшить объем измеренных эхосигналов в 4 раза. При этом его отличие от идеального ЦФА-изображения будет в среднем около 3 %.

Использование ГА для формирования коммутационной матрицы, прореженной по выстрелам до 25 %, повышает скорость регистрации эхосигналов в 4 раза.

Применение режима миграции для ГА позволяет дополнительно уменьшить ошибку еще примерно на 1,5 дБ.

Применение текстурного фильтра AADF сделало разницу между идеальным AADF-изображением и AADF-изображением, полученным по прореженной коммутационной матрице, еще меньше.

Предложенный подход для расчета прореженной коммутационной матрицы и ее использования при проведении контроля можно использовать и для АР, установленной на призму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jeune L.* Imagerie ultrasonore par emission d'ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion / Pour l'obtention du grade de Docteur de l'université Paris-Diderot. Paris, 2016. P. 119.
2. *Avagyan V.K., Bazulin E.G.* Increasing the Rate of Recording Echo Signals with an Ultrasonic Antenna Array Using Code Division Multiple Access Technology // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 873—886. [Авагян В.К., Базулин Е.Г. Увеличение скорости регистрации эхосигналов ультразвуковой антенной решеткой с применением технологии множественного доступа с кодовым разделением // Дефектоскопия. 2020. № 11. С. 3—16.]
3. *Bazulin E.* The maximum entropy method in ultrasonic non-destructive testing — increasing the resolution, image noise reduction and echo acquisition rate // Entropy. 2018. V. 20 (8). P. 621. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20080621>

4. *Базулин Е.Г., Соколов Д.А.* Восстановление ультразвуковых изображений отражателей по неполным данным методом распознавания со сжатием // *Акуст. журн.* 2019. № 4. С. 520—532.
5. ISO 23865:2021 Non-destructive testing — Ultrasonic testing — General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. URL: <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 27.08.2021).
6. Дефектоскоп-томограф A1550 IntroVisor. URL: <https://acsys.ru/defektoskop-tomograf-a1550-introvisor/> (дата обращения: 01.07.2021).
7. *Anselmi N., Gottardi G., Oliveri G., Salucci M.* Planar thinned array design by hybrid analytical-stochastic optimization // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*.
8. *Hu H., Du J., Ye C., Li X.* Ultrasonic phased array sparse-TFM imaging based on sparse array optimization and new edge-directed interpolation // *Sensors*. 2018. V. 18. P. 1830. DOI:10.3390/s18061830
9. *Fraser A.S.* Simulation of genetic systems // *J. of Theor. Biol.* 1962. V. 2. P. 329—346.
10. Методы оптимизации: Конспект лекций / Б.Ю. Лемешко. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 126 с.
11. *Bazulin E.G.* Application of Adaptive Anisotropic Diffusion Filter To Improve the Reflector Image Quality when Performing Ultrasonic Nondestructive Testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 5. P. 343—351. [*Базулин Е.Г.* Применение адаптивного анизотропного диффузного фильтра для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового неразрушающего контроля // *Дефектоскопия*. 2021. № 5. С. 3—12.]
12. *Jiang Z.-J., Zhao S.-M., Chen Y.-Y., Cui T.-J.* Method of array optimization for circular-boundary grid layout plane array based on differential evolution algorithm // *IET Micro-waves, Antennas & Propagation*.
13. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <http://www.echoplus.ru/> (дата обращения: 03.07.2021).

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭХОМЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

© 2021 г. В.Г. Карташев^{1,*}, Э.И. Трунов^{1,**}, Е.В. Шалимова^{1,***}, Р.В. Концов¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14
E-mail: *kartashevvg@mail.ru; **ediktrunov@mail.ru; ***shalimovayv@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021; после доработки 24.09.2021

Принята к публикации 08.10.2021

Рассматривается модернизация эхометода ультразвуковой дефектоскопии, отличающейся тем, что кроме решетки преобразователей, контактирующих с рабочей (передней) поверхностью объекта, дополнительно используется один или несколько приемных преобразователей на боковой поверхности объекта. Данный способ расположения антенных решеток позволяет существенно улучшить разрешающую способность, а в случае использования антенной решетки на боковой поверхности объекта — получить дополнительную информацию для построения изображения внутренней структуры объекта. С целью получения потенциальной разрешающей способности используется сверхширокополосный зондирующий сигнал с гауссовской огибающей в комбинации с оригинальным алгоритмом обработки сигналов, включающий в себя суммирование, одностороннее ограничение и перемножение принятых сигналов. В работе даны некоторые практические рекомендации. Проведена оценка потенциальной разрешающей способности в различных направлениях.

Ключевые слова: ультразвуковая дефектоскопия, разрешающая способность, антенная решетка, алгоритм, сверхширокополосный сигнал, обработка сигналов.

DOI: 10.31857/S0130308221110038

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая (УЗ) дефектоскопия является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля изделий. При этом наиболее информативным является эхометод, при котором излучающие и приемные преобразователи располагаются на одной и той же стороне объекта [1, 2]. Эхометод позволяет не только обнаружить дефекты и элементы структуры объекта, но и определить их координаты.

Расстояние до дефекта обычно измеряется посредством измерения временной задержки сигнала, точность измерения которой зависит от длительности зондирующего импульса.

Разрешающая способность по координате, параллельной зондируемой поверхности объекта, обеспечивается решеткой ультразвуковых преобразователей (антенной решетки), находящейся в акустическом контакте с поверхностью объекта. Чем больше размеры апертуры антенной решетки, тем выше разрешающая способность. На практике, как правило, разрешающая способность по глубине, которая обеспечивается измерением задержки сигнала, оказывается лучше, чем разрешающая способность в поперечном направлении, которая обеспечивается размерами антенной решетки. К тому же, разрешающая способность в поперечном направлении обычно ухудшается по мере продвижения вглубь объекта.

Этот недостаток можно преодолеть, если есть возможность разместить на боковой поверхности объекта один или несколько дополнительных приемных преобразователей [8]. Наличие дополнительных приемных преобразователей на боковой поверхности позволяет существенно увеличить разрешающую способность в поперечном направлении (вдоль координаты x на рис. 1).

А если на боковой поверхности объекта расположить не один преобразователь, а антенную решетку, параллельную оси z (см. рис. 1), то это позволит получить дополнительную информацию, необходимую для построения трехмерного изображения внутренней структуры объекта.

ВЫБОР ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

Разрешающая способность по дальности зависит от длительности сигнала: чем меньше длительность зондирующего сигнала, тем лучше получается разрешающая способность. Поэтому в качестве зондирующих сигналов должны использоваться короткие видеоимпульсы. Однако необходимо учитывать, что пьезопреобразователи имеют конечную полосу пропускания в окрестности резонансной частоты, и видеоимпульс, проходя через них, превращается в знакопеременный радиоимпульс. Как показано в [3], минимальную длительность при фиксированной ширине спектра имеет гауссов импульс.

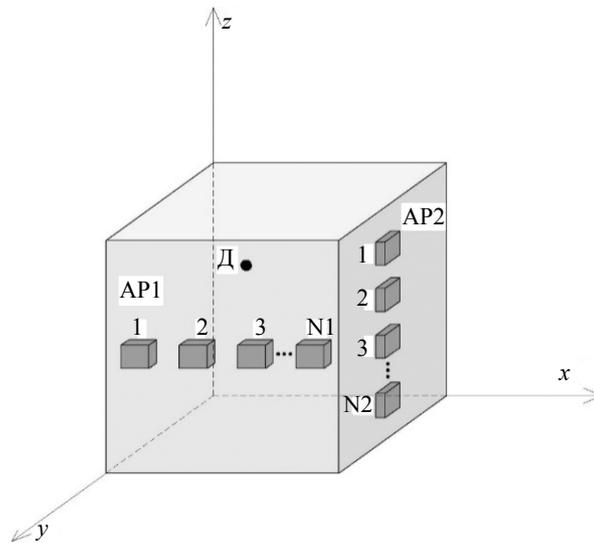


Рис. 1. Схема зондирования объекта.

Учитывая это обстоятельство, в качестве математической модели реального зондирующего сигнала при математическом моделировании мы будем рассматривать короткий радиоимпульс с гауссовой огибающей:

$$f(t) = U \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \cos(\omega_0 t), \tag{1}$$

где U — амплитуда сигнала; ω_0 — центральная частота спектра; τ — параметр, характеризующий ширину огибающей.

Зондирующий сигнал с гауссовой огибающей может быть получен при прохождении короткого видеоимпульса через преобразователи, форма частотной характеристики которых близка к гауссовой кривой. Параметр τ выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимальный уровень боковых лепестков сигнала, что позволяет минимизировать уровень ложных сигналов при возможности его практической реализации. На рис. 2а приведена временная диаграмма радиоимпульса с гауссовой огибающей при $\tau = 3,33/\omega_0$, а на рис. 2б — его спектр.

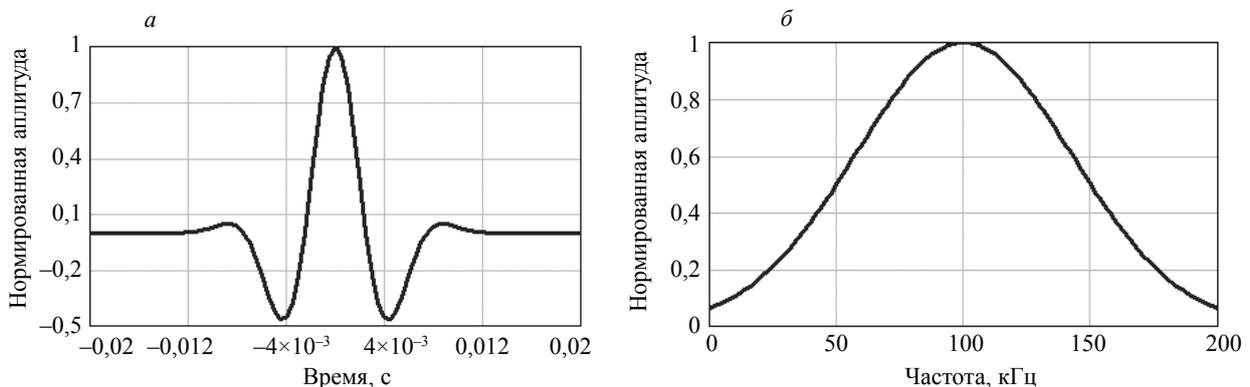


Рис. 2. Зондирующий сигнал (а) и его спектр (б).

Сигнал с параметром $\tau = 3,33/\omega_0$ во временной области имеет незначительный уровень положительных боковых лепестков (около 3%), что позволяет минимизировать уровень ложных сигналов. Если уменьшить значение параметра τ , уровень боковых лепестков станет еще меньше, однако практическая реализация такого сигнала может оказаться проблематичной. Поэтому рассматриваемый сигнал близок к предельно достижимому, а разрешающую способность метода при использовании такого сигнала можно рассматривать как потенциально возможную.

Еще одно преимущество рассматриваемого сигнала состоит в том, что если при обработке сигналов проводить ограничение сигналов снизу (т.е. обнулять отрицательные значения сигналов), то оставшаяся часть сигнала будет представлять собой видеоимпульс длительностью в половину периода колебания с частотой ω_0 . Это позволит реализовать максимально возможную разрешающую способность при заданной частоте зондирующего сигнала.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТА

Возможны различные варианты алгоритмов обработки сигналов, позволяющих построить изображение внутренней структуры объектов применительно к схеме размещения преобразователей, приведенной выше на рис. 1.

Наиболее простой алгоритм, позволяющий построить изображение при минимальном числе математических операций, использует только один излучающий преобразователь (ИП), входящий в состав антенной решетки AP1, расположенной на передней стороне объекта (см. рис. 1). Все остальные преобразователи в обеих антенных решетках работают как приемные. Зондирующий сигнал отражается от дефектов и элементов структуры объекта; отраженные сигналы принимаются приемными преобразователями, усиливаются и сохраняются в памяти компьютера для последующей обработки. Сигнал, принимаемый i -м приемным преобразователем антенной решетки AP1, обозначим как $u1_i(t)$, а сигнал, принимаемый j -м преобразователем решетки AP2, — как $u2_j(t)$.

Зондирующий сигнал, отраженный от заданной точки P и пришедший на приемные преобразователи, можно записать в виде: $u1_i(t) = A \cdot f(t - t_{1i})$ для i -го приемного преобразователя антенной решетки AP1 и $u2_j(t) = A \cdot f(t - t_{2j})$ для j -го преобразователя решетки AP2. Коэффициент A пропорционален коэффициенту отражения зондирующего сигнала в выбранной точке, $f(t)$ — функция, описывающая форму зондирующего сигнала. Временные задержки сигналов t_{1i} и t_{2j} вычисляются по формулам: $t_{2j} = l_{2j} / C$, $t_{1i} = l_{1i} / C$, где C — скорость УЗ волны; l_{1i} — длины путей от ИП до выбранной точки P и далее до i -го преобразователя антенной решетки AP1; l_{2j} — длины путей от ИП до выбранной точки P и далее до j -го преобразователя антенной решетки AP2.

Сигналы, пришедшие на приемные преобразователи, суммируются с такими задержками, чтобы обеспечить синхронное сложение всех сигналов, отраженных от выбранной точки P. Практически у принятых сигналов берется единственное значение, соответствующее задержке при отражении от выбранной точки P, и эти значения суммируются. В результате при суммировании сигналов, принятых преобразователями антенной решетки AP1 получается значение $S1 = N_1 A \cdot f(0)$, где N_1 — число приемных преобразователей AP1. Аналогично для антенной решетки AP2 получается значение $S2 = N_2 A \cdot f(0)$, где N_2 — число приемных преобразователей AP2.

После этого сигналы от обеих антенных решеток подвергаются одностороннему ограничению (т.е. обнуляются отрицательные значения) и перемножаются:

$$S0(x, y, z) = S1_{\text{огр}} \cdot S2_{\text{огр}}, \quad (2)$$

$$\text{где } S1_{\text{огр}} = \begin{cases} S1, & \text{если } S1 > 0 \\ 0, & \text{если } S1 \leq 0 \end{cases}, \quad S2_{\text{огр}} = \begin{cases} S2, & \text{если } S2 > 0 \\ 0, & \text{если } S2 \leq 0 \end{cases}$$

В результате для каждой точки пространства получается значение $S0$, пропорциональное квадрату коэффициента отражения от выбранной точки P с координатами (x, y, z) , а также оно зависит от напряженности поля, формируемого излучателями в данном конкретном месте. Повторяя эту процедуру для других точек пространства, можно получить изображение внутренней структуры объекта. Реализация этого алгоритма подробно рассмотрена в [8]. В результате расчетов в соответствии с изложенным выше алгоритмом получаются значения $S0$, пропорциональные квадрату коэффициента отражения. Это бывает удобно, если нужно выделить сильный сигнал и уменьшить более слабые, например, ослабить отражения от структурных неоднородностей материала. Если же нужно получить «пропорциональную» картину, то из результатов расчетов величины $S0$ следует извлекать квадратный корень.

Недостатком рассмотренного выше простого алгоритма является наличие «слепых» зон, где происходит подавление слабого сигнала более сильным. Если расстояния для двух отражателей различаются на половину длины волны, то максимум одного сигнала накладывается на отрицательный полупериод второго и происходит их взаимная компенсация. Если сигналы имеют одинаковую

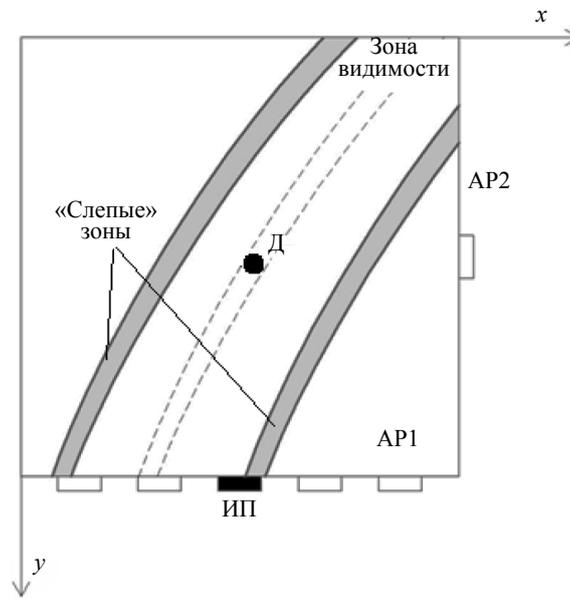


Рис. 3. Схема образования «слепых» зон.

амплитуду, то каждый из них ослабляется не более чем в 2 раза, и они хорошо различимы на изображении структуры объекта. Если же сигналы различаются по амплитуде более чем в 2 раза, то происходит полное или почти полное подавление более слабого сигнала. При этом сильный сигнал ослабляется незначительно. «Слепые» зоны, где происходит подавление слабых сигналов, имеют вид эллипсовидных полос (см. рис. 3).

Каждому сильному отражателю соответствуют две таких полосы, ширина каждой из них приблизительно равна $\lambda / (2\sqrt{2})$. Между ними располагается зона, где сигналы совпадают по фазе. Если слабый сигнал попадает в эту зону, то он, складываясь с сильным сигналом, как бы усиливается в несколько раз.

Подавление слабых сигналов — явление неопасное и даже желательное, если надо выделить один сигнал от наиболее сильного отражателя. Однако, если нужно получить полную информацию о структуре объекта, с этим явлением необходимо бороться.

Если не усложнять систему преобразователей, то наиболее простой выход из положения состоит в следующем. Зондирование нужно проводить с помощью нескольких ИП, работающих поочередно и расположенных в разных местах антенной решетки AP1. При этом положение «слепых» зон, которые представляют собой узкие полосы, будет меняться. После каждого зондирования производится обработка принятых сигналов в соответствии с изложенным выше алгоритмом и формируется изображение структуры объекта. Изображения, полученные с помощью разных ИП, суммируются. При этом, если слабый отражатель попал в «слепую» зону при одном положении ИП, то при другом положении ИП велика вероятность, что он в «слепую» зону не попадет. Если число зондирований из разных позиций достаточно велико, то происходит сглаживание, а после извлечения квадратного корня картина еще больше нивелируется и, в итоге, картина слабо отличается от истинной.

Чем больше число излучающих преобразователей, тем лучше качество изображения. В предельном случае мы получаем режим SAFT или SAFT-C [4, 5], когда каждый элемент решетки AP1 поочередно работает как излучающий. Этот режим не только позволяет получить высокое качество изображения, но и обеспечивает эффективное подавление шумов.

Если возникает задача получения адекватного изображения наиболее простыми методами, то число излучающих преобразователей должно быть не меньше трех.

ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Оценка разрешающей способности рассматриваемого метода проводилась с помощью математического моделирования. Моделирование осуществлялось в пакете прикладных программ MATLAB. В качестве зондирующего сигнала использовался короткий радиоимпульс с гауссовой

огibaющей, описываемый выражением (1) при заданном $\tau = 3,33/\omega_0$. Такой сигнал после операции ограничения имеет незначительный уровень боковых лепестков (около 0,03), которые практически не влияют на качество изображения. Использовать еще более короткие импульсы не имеет смысла, так как это практически не улучшит разрешающую способность, а формирование таких сигналов может представлять неоправданно сложную задачу. Поэтому можно считать, что результаты данного моделирования позволяют оценить потенциальную разрешающую способность метода.

Предполагалось, что отражатели — точечные, а отраженная УЗ волна будет равномерно рассеиваться во всех направлениях. При моделировании не учитывались ослабление сигнала в процессе распространения и диаграммы направленности преобразователей. Эти факторы слабо влияют на разрешающую способность, пока отношение сигнал/шум остается достаточно большим. Однако при сильном частотно-зависимом затухании УЗ волн в среде спектр сигнала сужается и смещается в сторону более низких частот. При этом длительность сигнала увеличивается, что приводит к ухудшению разрешающей способности.

Разрешающая способность в разных направлениях определяется разными физическими процессами: в плоскости xOy она определяется точностью измерения задержки сигналов, а в направлении координаты z — фокусировкой УЗ волн антенной решеткой АР2. Поэтому разрешающую способность в разных направлениях мы будем рассматривать отдельно.

Для оценки потенциальной разрешающей способности нет необходимости моделировать полный алгоритм обработки сигналов. Достаточно использовать простейший алгоритм, в котором работает только один излучающий преобразователь.

При моделировании предполагалось, что каждая АР содержала 21 элемент. Шаг АР (расстояние между соседними элементами) составлял $0,75\lambda$, апертура каждой АР — 15λ . Моделировалось отражение от двух точечных отражателей, расположенных напротив середины каждой АР на небольшом расстоянии друг от друга; расстояние до каждой АР составляло около 10λ .

Рассмотрим сначала разрешающую способность в плоскости xOy . Как показали результаты моделирования, разрешающая способность зависит от взаимного расположения отражателей и от степени различия коэффициентов отражения от этих отражателей. Наилучшая разрешающая способность получается, если отражатели равновеликие. В этом случае два отражателя успешно различаются, если расстояние между ними вдоль координаты x превышает $0,6\lambda$ (см. рис. 4б) или если расстояние между ними вдоль координаты y превышает $0,2\lambda$ (см. рис. 5).

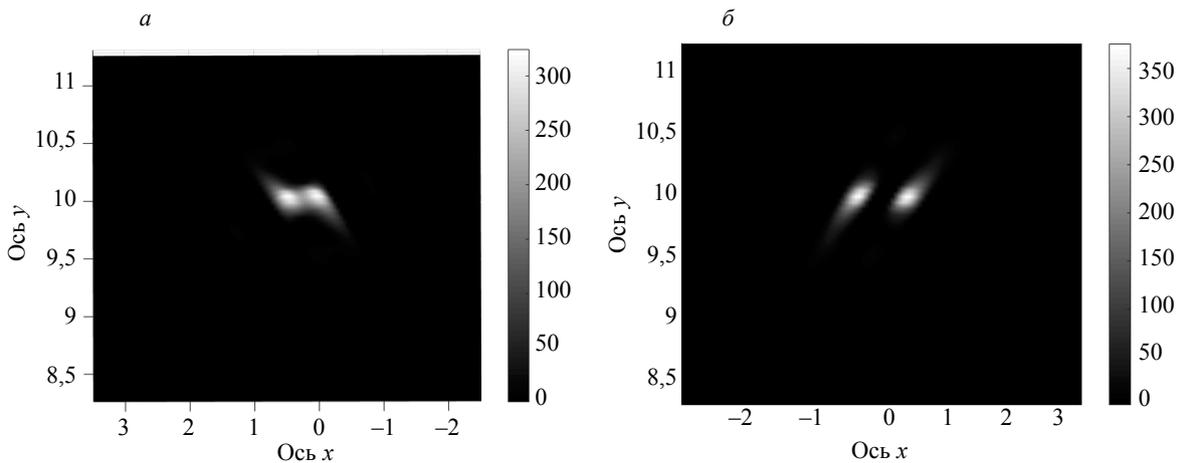


Рис. 4. Изображение двух точечных отражателей, разнесенных в направлении оси x на $0,5\lambda$ (а) и на $0,7\lambda$ (б).

В промежуточных направлениях разрешающая способность принимает промежуточные значения. При очень маленьком расстоянии между отражателями отраженные сигналы частично накладываются друг на друга и происходит их частичная взаимная компенсация: у верхнего отражателя ослабляется правая сторона, а у нижнего — левая. В результате на изображении (рис. 5а) они оказываются не точно один над другим, хотя в модели для них установлены одинаковые значения координаты x . При увеличении расстояния между отражателями (рис. 5б) этот эффект перестает проявляться.

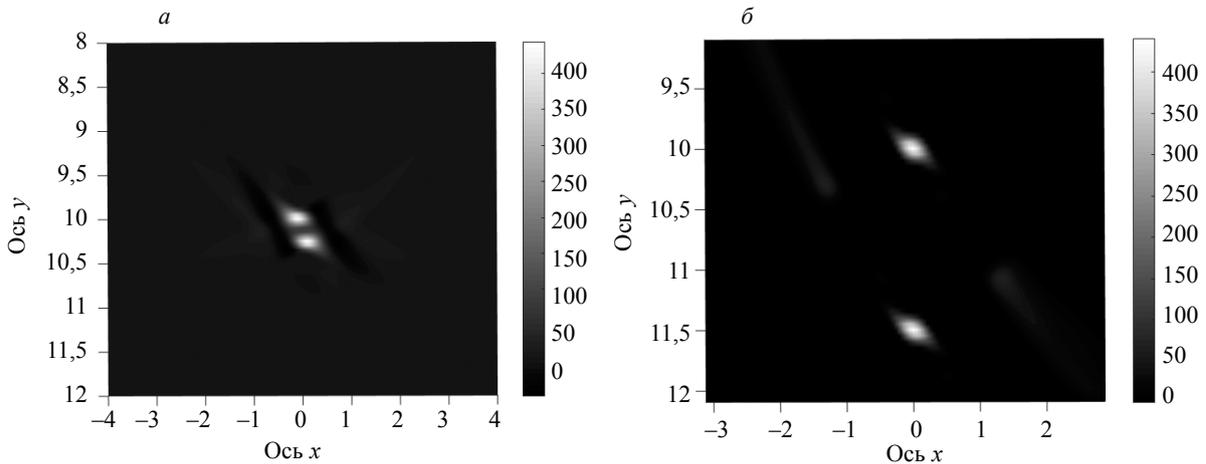


Рис. 5. Изображение двух точечных отражателей, разнесенных в направлении оси y на $0,21\lambda$ (a) и на $1,5\lambda$ (b).

Изображения на рис. 4 и 5 соответствуют предельной разрешающей способности, когда равновеликие сигналы, отраженные от соседних отражателей, разнесены во времени только на половину периода, поэтому частично компенсируют друг друга, но все же хорошо различимы. Но если при таком же расстоянии между отражателями сигналы различаются по амплитуде более, чем в 2 раза, то происходит подавление слабого сигнала сильным. Поэтому для отражателей разной величины разрешающая способность получается в 2 раза хуже, чем для одинаковых отражателей.

Разрешающая способность в направлении координаты z обеспечивается антенной решеткой AP2. Чем больше размер апертуры AP2, тем лучше разрешающая способность. Однако при очень больших размерах апертуры антенной решетки AP2 рост разрешающей способности замедляется из-за того, что сигнал на крайние элементы AP2 приходит более ослабленным, чем на центральные элементы решетки. Этот эффект усиливается при сильном затухании УЗ волн в среде, а также из-за того, что ДН преобразователей, входящих в состав AP2, не является все-направленной. В качестве примера на рис. 6 представлены графики сечения изображения двух отражателей, расположенных на расстоянии 2λ друг от друга при числе элементов решетки AP2 $N_2 = 21$ (рис. 7а) и $N_2 = 51$ (рис. 6б).

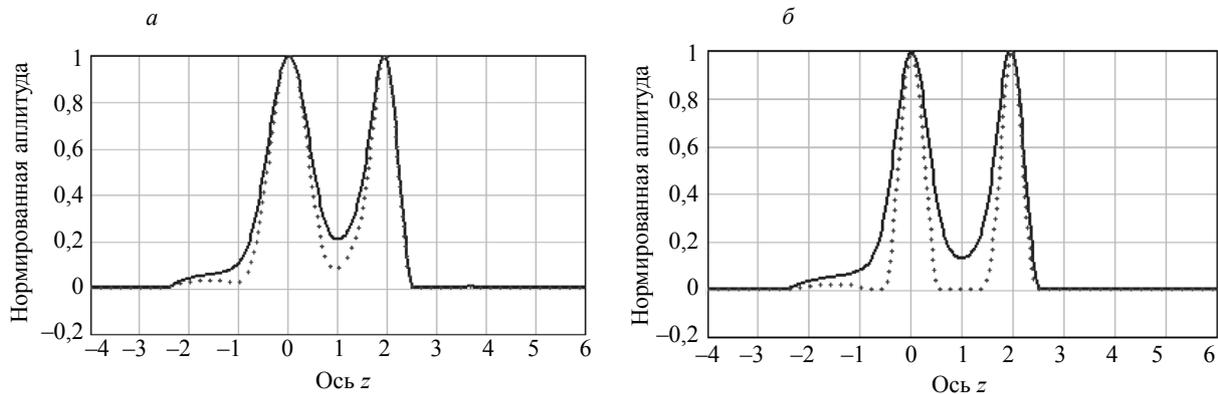


Рис. 6. Сечение изображения двух точечных отражателей, разнесенных в направлении оси z на 2λ : a — при 21-элементной решетке AP2; b — при 51-элементной решетке AP2.

Шаг антенной решетки предполагался равным $0,8\lambda$, расстояние от отражателей до решетки AP2 — 10λ . Пунктирная линия соответствует идеальному варианту, когда ДН преобразователей — всенаправленные, а затухание УЗ волн в среде отсутствует. Сплошная линия соответствует ситуации, когда ДН преобразователей описывается выражением $F(\theta) = \cos \theta$, а затухание УЗ волн в среде составляет 0,2 непера на длину волны или 44 дБ/м при длине волны 40 мм (усредненные данные

для бетонных конструкций). Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что нет смысла использовать антенные решетки с очень большой апертурой; размер апертуры решетки AP2 не должен сильно превышать расстояние от AP2 до исследуемой области объекта контроля.

НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенный анализ позволяет сформулировать некоторые рекомендации по выбору параметров антенных решеток.

В отличие от антенной решетки AP2, размеры апертуры решетки AP1 почти не влияют на разрешающую способность по координате z . Основное предназначение этой AP — препятствовать формированию ложных сигналов (формированию изображений ложных отражателей). Ложные изображения могут возникать при маленькой апертуре решетки AP1, когда объект контроля содержит несколько отражателей. В процессе обработки сигналов может сложиться ситуация, когда при перемножении сигналов $S1$ и $S2$ в соответствии с формулой (2) накладываются друг на друга и перемножаются сигналы, принадлежащие разным отражателям. В результате формируется ложное изображение отражателя. Чтобы это не происходило, необходимо осуществлять предварительную пространственную селекцию отражателей с помощью антенной решетки AP1. Для этого решетка AP1 должна иметь достаточно большую апертуру. Как показали результаты моделирования, для успешного выполнения этой функции размеры апертуры решетки AP1 должны быть не меньше, чем расстояние до обследуемой области контролируемого объекта.

При оценке разрешающей способности с помощью математического моделирования шаг обеих AP был принят равным $0,75\lambda$. Однако, как показали последующие исследования, такие же результаты получаются при шаге AP, равном длине волны или даже чуть больше. Но если шаг AP превышает $1,2\lambda$, возможно формирование ложных сигналов.

Преобразователи, входящие в состав антенных решеток, должны иметь широкую диаграмму направленности. Это могут быть либо малоапертурные преобразователи продольных акустических волн с диаграммой направленности вида $F(\theta) = \cos \theta$, либо преобразователи с сухим точечным контактом [6, 7], имеющие еще более широкую диаграмму направленности.

Второе требование, предъявляемое к преобразователям, — широкая полоса пропускания. Она должна быть достаточной для прохождения рассмотренных выше сверхширокополосных радиоимпульсов. При недостаточно широкой полосе пропускания преобразователей длительность зондирующих импульсов будет увеличиваться, что приведет к ухудшению разрешающей способности.

Возможны различные модификации рассматриваемого метода УЗ дефектоскопии. Например, не всегда есть возможность разместить многоэлементную AP на боковой поверхности. В этих случаях приходится ограничиться короткой антенной решеткой или даже единичным приемным преобразователем на боковой поверхности объекта. Такая конфигурация антенной системы не позволяет получить разрешение в направлении координаты z , но наличие даже одного приемного преобразователя на боковой поверхности объекта в сочетании с изложенным выше алгоритмом позволяет в несколько раз увеличить разрешающую способность в направлении координаты x по сравнению с традиционной схемой, когда используется только одна антенная решетка на передней поверхности объекта. На рис. 7 приведены результаты моделирования при разном количестве элементов в AP.

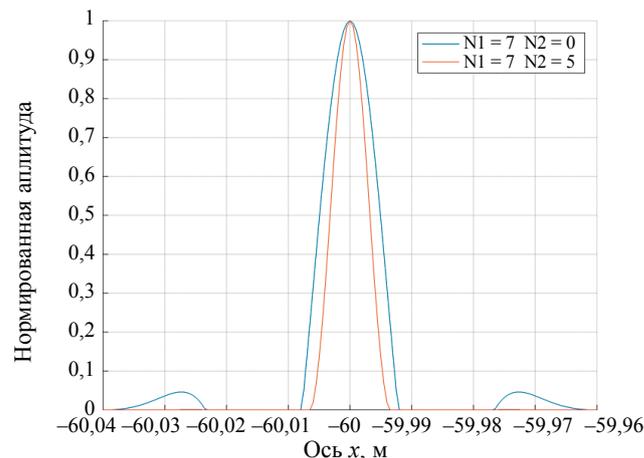


Рис. 7. Сечения для разных размеров антенной решетки в направлении координаты x .

Рассмотренную антенную систему можно модифицировать для того, чтобы получить хоть какую-то разрешающую способность в направлении координаты z . Для этого можно каждый элемент антенной решетки AP1 выполнить в виде нескольких параллельно соединенных преобразователей, расположенных по прямой линии, параллельной оси z .

Основная область применения рассматриваемого метода, как нам представляется, — неразрушающий контроль строительных конструкций из бетона и других материалов с неоднородной структурой. Метод может быть использован и для контроля состояния круглых колонн; при этом антенная решетка AP1 должна иметь дугообразную форму и должны быть скорректированы расчетные формулы, которые используются в алгоритме обработки сигналов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проверки работоспособности предложенного метода был проведен эксперимент. В качестве объекта контроля использовался бетонный блок (марка бетона М300) с размерами $350 \times 400 \times 280$ мм (см. рис. 8) с искусственным дефектом в виде отверстия. Диаметр отверстия равен 50 мм. В качестве зондирующего сигнала был взят один период синуса длительностью 20 мкс и амплитудой 10 В. Для такого сигнала центральная частота 50 кГц, ширина спектра 50 кГц. Выбор такой низкой частоты обусловлен неоднородностью внутренней структуры бетона, приводящей к высокому значению затухания ультразвуковых колебаний.

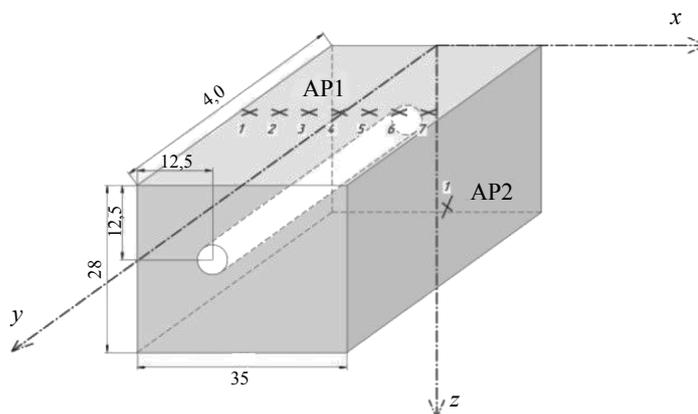


Рис. 8. Объект контроля.

Для возбуждения и приема продольных волн использовались пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) фирмы «Акустические контрольные системы» с артиклем S1803. Датчики были объединены в две AP — AP1 и AP2, которые располагались сверху и сбоку контролируемого объекта, соответственно (рис. 9). Расстояние между соседними элементами AP $d = 30$ мм.

Результаты эксперимента представлены на рис. 9. В зависимости от числа элементов, входящих в состав антенных решеток AP1 и AP2, изменялась картина изображения. Картина внутренней структуры, представленная на рис. 9а, содержит ложные отражатели и не позволяет получить изображение отверстия. Это связано с недостаточным числом ПЭП AP1. Добавление даже одного элемента второй антенной решетки AP2 приводит к существенному улучшению изображения даже при недостаточном числе элементов AP1 и позволяет получить изображение отверстия (рис. 9б), что подтверждает эффективность предложенного метода. Увеличение числа элементов решетки AP1 приводит к улучшению качества изображения, что видно из сравнения рис. 9а и 9в.

Добавление элементов антенной решетки AP2, расположенной на боковой поверхности, приводит к улучшению разрешающей способности и, соответственно, к улучшению качества изображения внутренней структуры объекта, что видно из сравнения рис. 9в и 9г.

Для сравнения приведем картину изображения (см. рис. 10) при обычном алгоритме SAFT-C.

Результаты проведенных экспериментов показали, что в случае использования предложенного алгоритма обработки пятно имеет более выраженный цвет и очертание, что говорит о лучшей разрешающей способности.

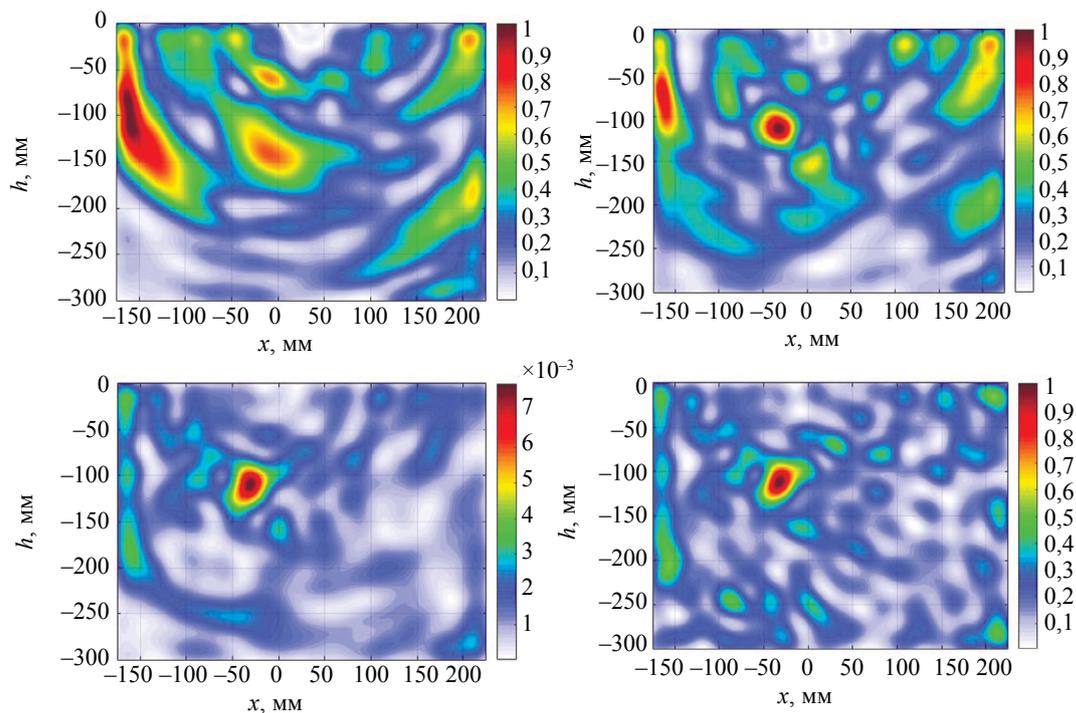


Рис. 9. Картина внутренней структуры объекта при разном количестве элементов на передней N1 и боковой стенке N2: *a* — N1 = 4, N2 = 0 (боковой решетки нет); *b* — N1 = 4, N2 = 1; *c* — N1 = 7, N2 = 0 (боковой решетки нет); *d* — N1 = 7, N2 = 5.

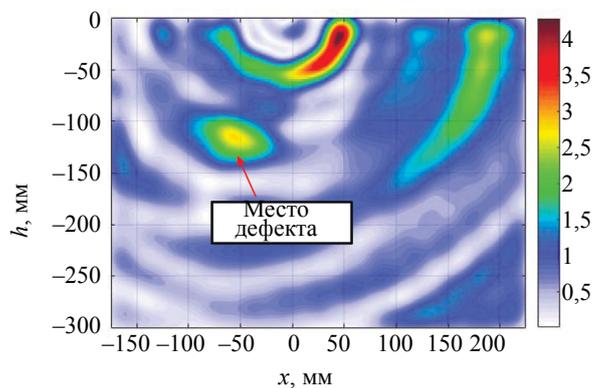


Рис. 10. Картина внутренней структуры объекта N1 = 7, N2 = 5 при использовании классического алгоритма SAFT-C.

Вдобавок, когда требуется высокое быстродействие при минимальных аппаратно-вычислительных ресурсах, можно использовать только один элемент боковой антенной решетки AP2.

ВЫВОДЫ

Специфика рассмотренного метода УЗ дефектоскопии состоит в том, что кроме антенной решетки, контактирующей с одной из поверхностей объекта, используются дополнительные приемные преобразователи на боковой поверхности объекта. В сочетании со сверхширокополосным зондирующим сигналом и своеобразным алгоритмом обработки это позволяет в несколько раз увеличить фронтальную разрешающую способность, а при использовании достаточно большой антенной решетки на боковой поверхности объекта — получить трехмерное изображение внутренней структуры объекта. Наиболее перспективная область применения метода — неразрушающий контроль строительных конструкций из бетона и других строительных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-38-90223.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацепин А.Ф.* Акустический контроль: учебное пособие / А. Ф. Зацепин; под. общ. ред. В.Е. Щербина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. 211 с.
2. *Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н.* Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
3. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ / Изд. 5-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.
4. *Schickert M., Krause M., Müller W.* Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique // Journal of Materials in Civil Engineering. 2003. V. 15. P. 235—246.
5. *Базулин Е.Г.* Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учетом анизотропии материала объекта контроля // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 42—52.
6. *Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.* Ультразвуковой низкочастотный преобразователь // Патент РФ № 2082163. Бюлл. изобр. № 17. 1997.
7. *Данилов В.Н., Самокрутов А.А., Люткевич А.М.* Теоретические и экспериментальные исследования малоапертурных прямоугольных преобразователей // Контроль. Диагностика. 2003. № 7. С. 29—33.
8. *Kartashev V.G., Trunov E.I., Shalimova E.V.* Effective ultrasonic flaw detection method / Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020. 2020. С. 9059192.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РОТАЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ

© 2021 г. Р.С. Гайсин^{1,*}, В.Ю. Тюканько^{1,**}, А.В. Демьяненко^{1,***}

¹НАО «СКУ» им. М. Козыбаева, Россия РК 150000 Петропавловск, ул. Пушкина, 86
E-mail: *raikoshan001@mail.ru; **vetal3333@mail.ru; ***demianenkoav@mail.ru

Поступила в редакцию 22.09.2021; после доработки 22.10.2021
Принята к публикации 22.10.2021

В настоящее время в мире ускоренными темпами развивается технология ротационного формования пластмасс. Однако при данном методе переработки возможно возникновение в стенках изделий «микробузырьков», которые значительно ухудшают их качество. В данной работе для оценки качества пластиковых изделий был применен метод ультразвукового контроля (УЗК). С помощью эхометода при рабочей частоте 2,5 МГц был проведен анализ образцов различной степени качества. Выявлено, что скорость распространения ультразвукового сигнала не зависит от степени качества изделий и составляет 2330 ± 10 м/с. Установлено, что чем больше параметр шероховатости поверхности изделий R_z (от 2,5 до 20 мкм), тем меньше становится амплитуда донного сигнала A_d . Недопеченный образец определяется по параметрам A_d (от -6,0 до -15,0 МГц). Определен эталонный образец ($\rho = 0,942$ г/см³), с помощью которого можно калибровать дефектоскоп, его $A_d = 0$ дБ при рабочей частоте 2,5 МГц. Выявлена зависимость между плотностью/пропеченностью изделий и амплитудой донного сигнала. Доказана возможность выявления внутренних дефектов изделий методами УЗК. Предложена новая методика выявления годных изделий в производстве, с помощью которой можно определить степень качества изделий.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, пластиковые изделия, ротационное формование, оценка качества изделий.

DOI: 10.31857/S013030822111004X

ВВЕДЕНИЕ

Изделия, полученные методом ротационного формования, характеризуются длительным сроком эксплуатации, химической стойкостью и низкой себестоимостью. Однако в связи со сложностью геометрических форм изделий (наличия большого количества радиусов, переходов и т.п.) и относительно высокой их стоимостью (при разрушающем контроле/разрезки изделий затраты могут составить сотни тысяч рублей), актуальным вопросом становится использование неразрушающих методов контроля для оценки качества полученных изделий.

При ротационном формовании происходит распределение сырьевого материала по внутренней поверхности полости формы, а одновременный нагрев формы вызывает его расплавление с образованием тонкого покрытия в виде оболочки [1]. На второй стадии процесса между сплавляемыми частицами пластмассы образуются жидкие мостики, задерживающие пузырьки воздуха, которые должны исчезнуть на последующей стадии уплотнения, и все это происходит при высоких температурах выше температуры плавления полиэтилена [2]. Если не избавиться от этих пузырьков, то изготовленные изделия будут иметь низкую ударную вязкость [3]. При перегреве изделия в форме происходит термоокислительная деструкция материала и ухудшение его механических свойств [4].

Сейчас производители изделий методом ротационного формования вынуждены для поддержки высокого уровня качества выпуска продукции проверять разрушающим контролем небольшое количество изделий из каждой партии. Это создает большие сложности по нескольким причинам. Во-первых, это длительный и дорогостоящий процесс; во-вторых, всегда остается шанс на то, что бракованное изделие не будет выявлено на этапе контроля. Ударная вязкость готовых емкостей является наиболее важной характеристикой для оценки качества изделия, на которое влияют условия процесса [1, 5]. В источниках [6, 7] описаны способы оценки качества изготовленных изделий за счет контроля модуля упругости, твердости и вязкости материала. Термодеструкция материала вызывает рост вязкости полиэтилена, которое может быть выявлено по анализу текучести расплава [8] или геометрией параллельных пластин [9].

Однако ни один из этих методов контроля неприменим в промышленности для обеспечения качества серийно выпускаемых изделий из-за стоимости и геометрических особенностей изделий (изготовленных методом ротационного формования). Поэтому, для повышения эффективности

процесса и уменьшения затрат на выявление бракованных изделий стоит применить методы неразрушающего контроля. В источнике [10] описан метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FT-IR), которая использовалась для идентификации продуктов окисления на поверхности изделий (изготовленных методом ротационного формования). Также рассматривались рентгеновская дифракция [11] и комбинационная рассеивающая спектроскопия [12], которые использовались для оценки изменений морфологии кристаллов на предмет признаков разрушения. Ни один из этих методов не является легко встраиваемым в технологический процесс из-за своей дороговизны. В качестве альтернативы были рассмотрены линейные ультразвуковые методы контроля для полиэтилена, проведены сравнения акустических свойств с различными материалами при различных температурах и различных напряжениях [13, 14]. Традиционные ультразвуковые методы очень эффективны для измерения плотности полиолефинов и полимерных пен путем соотношения этого свойства с изменениями скорости или затуханием звуковой волны, распространяющейся через образец [15—17].

В работе [18] рассмотрен анализ эффекта Маллинза в полиэтилене с контролем деформаций с помощью ультразвука. В исследовании предложен метод контроля развития эффекта Маллинза, который позволяет исследовать изделие (полученное методом ротационного формования) на основе анализа ультразвукового контроля. Показано, что затухание ультразвукового сигнала увеличивалось в корреляции с возрастающей деформацией полиэтилена. В [18] показана возможность выявления дефектов в изделиях (полученных методом ротационного формования) методом ультразвукового контроля при рабочей частоте в диапазоне от 135 до 165 кГц. В [18] доказана возможность оценки качества изделий (изготовленных методом ротационного формования) ультразвуковым анализом и внедрение его в технологический процесс.

Главной задачей данной работы является выявление внутренних дефектов в изделиях (изготовленных методом ротационного формования), а так же определение степени качества/пропеченности изделий с помощью метода УЗК и внедрение этого метода в производство для контроля качества емкостей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются емкости из полиэтилена, изготовленные методом ротационного формования на предприятии ТОО «AVAGRO». При проведении экспериментов использовали образцы, вырезанные из бочек разной степени качества/пропеченности (плотности) (табл. 1).

Таблица 1

№ образца	Плотность изделия ρ , г/см ³	Средняя энергия разрушения MFE, Дж	Степень пропеченности изделия	Годность изделия
1	0,934	140	Недопеченный	Брак
2	0,934	140	Недопеченный	Брак
3	0,934	140	Недопеченный	Брак
4	0,941	380	Нормальный	Годен
5	0,941	380	Нормальный	Годен
6	0,941	380	Нормальный	Годен
7	0,949	147	Перепеченный	Брак
8	0,949	147	Перепеченный	Брак
9	0,949	147	Перепеченный	Брак
10	0,949	150	Сгоревший	Брак
11	0,949	150	Сгоревший	Брак
12	0,949	150	Сгоревший	Брак

Для изделий, идентифицируемых как «качественные», средняя энергия разрушения (MFE) принимает значение не менее 380 Дж. Так же важным критерием годности изделий является плотность, которая должна быть не менее 0,9395 г/см³. Толщина исследуемых образцов составляет 8 мм, т.к. они были вырезаны из одной серии изготовленных емкостей.

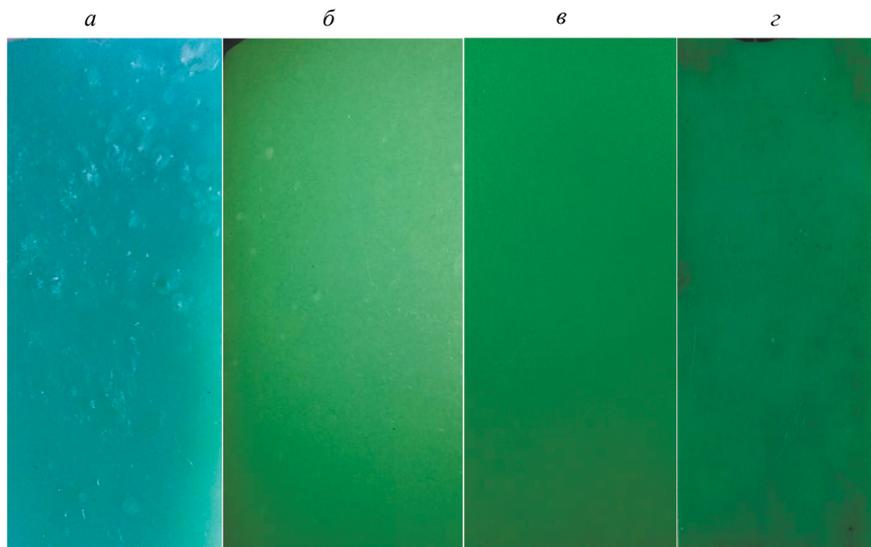


Рис.1. Образцы для ультразвукового контроля:

a — недопеченный образец; *б* — нормально спеченный образец; *в* — перепеченный образец; *г* — сгоревший образец.

В исследовании ультразвуковой дефектоскопией образцов (рис. 1) определяли следующие характеристики: скорость распространения ультразвуковой волны, амплитуду донного сигнала. Анализ осуществлялся с помощью ультразвукового контактного преобразователя 2,5-К12 на универсальном ультразвуковом дефектоскопе УСД-60.

Метод проведения эксперимента заключался в том, что пьезоэлектрический преобразователь 2,5-К12 устанавливался на поверхность изделия с предварительно нанесенным глицерином для эффективности прохождения сигнала. Во избежании погрешностей, вызванных разным давлением, оказываемым на пьезометрический преобразователь, исследование проводили при установке на преобразователь груза массой 100 г (рис. 2).

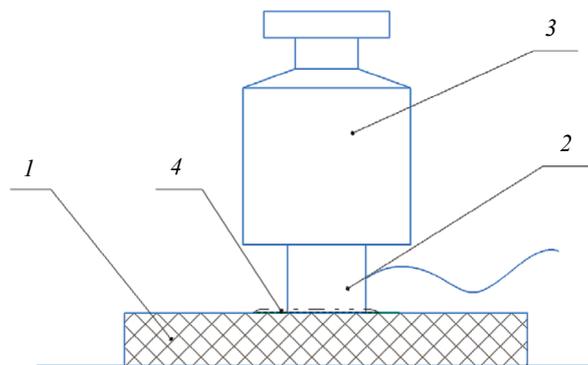


Рис.2. Схематическое изображение проведенного эксперимента:

1 — образец; *2* — пьезометрический преобразователь; *3* — груз; *4* — слой глицерина.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Для определения скорости ультразвука были использованы образцы разной степени пропеченности и плотности (см. табл. 1). Скорость распространения продольной ультразвуковой волны (ПУВ) во всех образцах составляет — 2330 ± 10 м/с. Скорость распространения ПУВ не зависит от степени качества/пропеченности материала и плотности полиэтилена.

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАЗЦОВ НА ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА

Для проведения эксперимента была подготовлена серия образцов с различной шероховатостью ($Ra_1 = 2,5$ мкм; $Ra_2 = 5$ мкм; $Ra_3 = 20$ мкм). Затухание ультразвукового сигнала оценивали по величине амплитуды донного сигнала; были обработаны поверхности образцов № 1, № 4, № 7, № 10 наждачной бумагой. Исследования проводились при рабочей частоте 2,5 МГц.

Установлено, что чем больше значение шероховатости поверхности образца, тем меньше амплитуда (Aa) донного сигнала (рис. 3). Также было выяснено, что недопеченный образец № 1 идентифицируется по низкому значению амплитуды донного сигнала Aa (от $-6,0$ до $-15,0$ МГц).

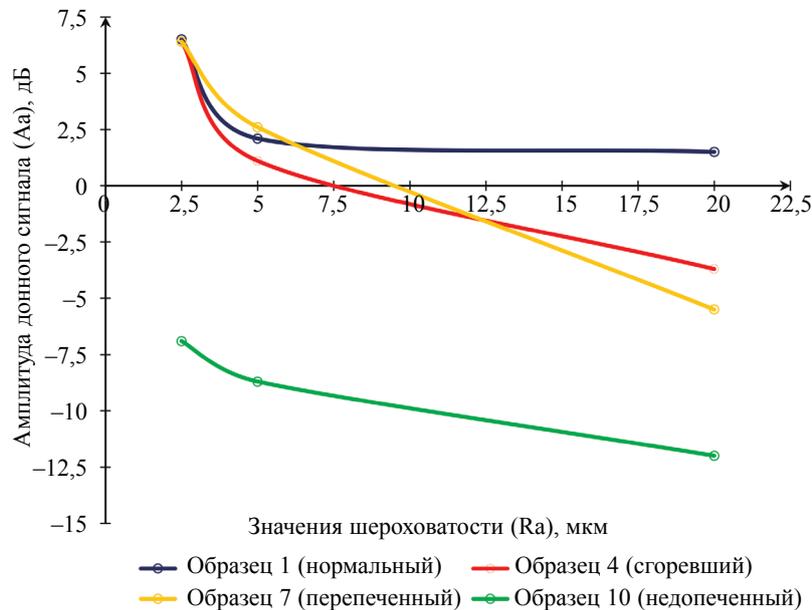


Рис. 3. Зависимость амплитуды донного сигнала от значения шероховатости поверхности образцов (при частоте 2,5 МГц).

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ОБРАЗЦОВ НА ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА

В исследовании по выявлению зависимости амплитуды от плотности изделий были подготовлены образцы толщиной 8 мм (табл. 2). Затухание ультразвукового сигнала оценивали по величине амплитуды донного сигнала, величина которой зависела от плотности образцов. Исследования проводились при рабочей частоте 2,5 МГц.

Таблица 2

№ образца	ρ , г/см ³	Степень пропеченности изделия	Годность изделия
1	0,934	Недопеченный	Брак
2	0,940	Нормальный	Годен
3	0,941	Нормальный	Годен
4	0,942	Нормальный	Годен
5	0,944	Нормальный	Годен
6	0,946	Нормальный	Годен
7	0,947	Нормальный	Годен
8	0,948	Нормальный	Годен
9	0,949	Перепеченный	Брак

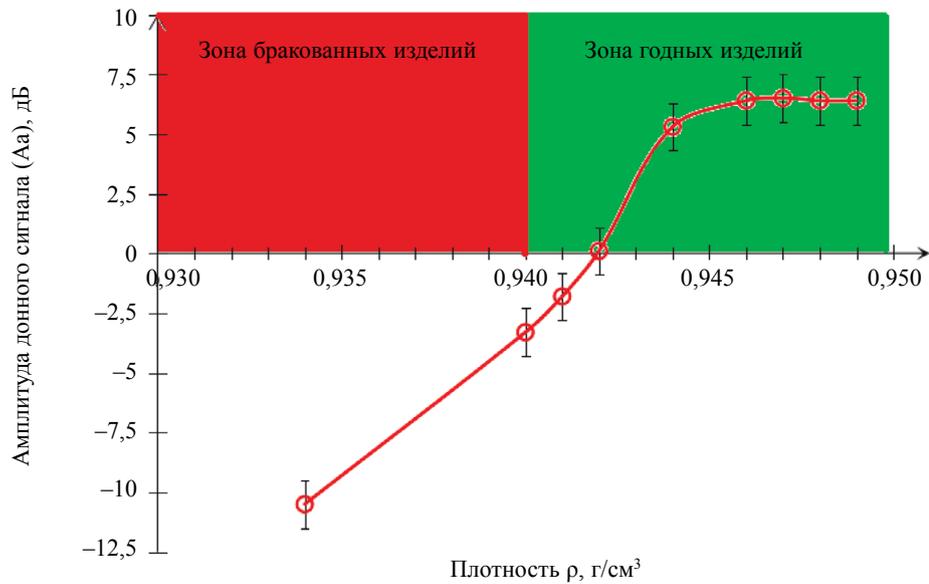


Рис. 4. Влияние плотности на амплитуду донного сигнала (при частоте 2,5 МГц).

По мере увеличения плотности образцов из полиэтилена с 0,934 до 0,948 г/см³ амплитуда донного сигнала увеличивается. При плотности свыше 0,944 г/см³ наблюдается стабилизация амплитуды донного сигнала (рис. 4). Критерием годности образцов предлагается использовать значение амплитуды донного сигнала в промежутке от –5,0 дБ и больше. В ходе экспериментов был выявлен эталонный образец $\rho = 0,942$ г/см³, амплитуда донного сигнала образца составляет 0 дБ при рабочей частоте 2,5 МГц. Критерий годности изделий рекомендуется использовать только после калибровки ультразвукового дефектоскопа по образцу-эталоны. Амплитуда донного сигнала перепеченного образца от нормального не различается.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА НА ОБРАЗЦЫ С РАЗНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Для проведения эксперимента была подготовлена серия образцов с различной плотностью (см. табл. 2). Затухание ультразвукового сигнала оценивали по величине амплитуды донного сигнала. Исследования проводились при рабочей частоте в диапазоне от 0,5 до 30 МГц (рис. 5).

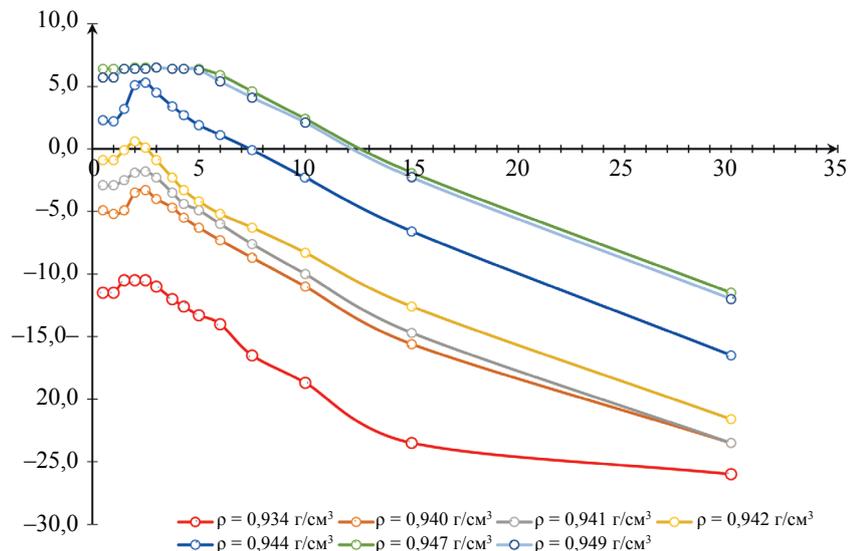


Рис. 5. Влияние частоты сигнала и плотности образцов на амплитуду донного сигнала (при частоте 2,5 МГц).

По мере увеличения частоты сигнала от 0,5 до 2,5 МГц амплитуда донного сигнала увеличивается на всех образцах вне зависимости от плотности. При частоте свыше 2,5 МГц амплитуда донного сигнала уменьшается. Недопеченный образец легко выявляется относительно других, имея самую низкую амплитуду донного сигнала ($\rho = 0,934 \text{ г/см}^3$). Перепеченные и нормально спеченные образцы имеют практически одинаковые параметры амплитуды донного сигнала.

ВЫВОДЫ

1) Скорость распространения продольной ультразвуковой волны в изделиях, полученных методом ротационного формования, не зависит от степени качества (пропеченности) изделия и составляет $2330 \pm 10 \text{ м/с}$.

2) При увеличении параметра шероховатости образцов Ra (с 2,5 до 20 мкм) амплитуда донного сигнала уменьшается. Недопеченные образцы, имеющие плотность меньше $0,9395 \text{ г/см}^3$, легко идентифицировать по отрицательному значению амплитуды донного сигнала.

3) Выявлена зависимость между плотностью образцов и амплитудой (А) донного сигнала. При увеличении плотности график $A=f(\rho)$ имеет два участка. Первый участок позволяет идентифицировать недопеченные изделия (имеющие низкую плотность и ударную вязкость). Второй участок показывает стабилизацию амплитуды донного сигнала, которая имеет одинаковые параметры в перепеченных и нормально спеченных изделиях.

4) Установлено влияние частоты сигнала на амплитуду донного сигнала. В диапазоне частот от 0,5 до 2,5 МГц амплитуда донного сигнала увеличивалась, а при частоте свыше 2,5 МГц уменьшалась вне зависимости от плотности образцов.

5) Результаты данных исследований рекомендуются для дальнейшего внедрения в промышленность для контроля качества емкостей (изготовленных методом ротационного формования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gibson Ian, Shi Dongping*. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process // *Rapid Prototyping Journal*. Dec. 1997. V. 3 (4). P. 129—136.
2. *Kontopoulou M., Vlachopoulos J.* Bubble dissolution in molten polymers and its role in rotational molding // *Polymer Engineering & Science*. Jul. 1999 V. 39 (7). P. 1189—1198.
3. *Spence A.G., Crawford R.J.* The effect of processing variables on the formation and removal of bubbles in rotationally molded products // *Polymer Engineering & Science*. Apr. 1996. V. 36 (7). P. 993—1009.
4. *Epacher E.* Processing stability of high density polyethylene: effect of adsorbed and dissolved oxygen // *Polymer*. Nov. 2000. V. 41 (23). P. 8401—8408.
5. *Chaudhary Bharat Indu, Takács Elizabeth, Vlachopoulos John*. Processing enhancers for rotational molding of polyethylene // *Polymer Engineering & Science*. Oct. 2001. V. 41 (10). P. 1731—1742.
6. *Tavares Andreia C., Gulmine Joseane V., Lepienski Carlos M., Akcelrud Leni*. The effect of accelerated aging on the surface mechanical properties of polyethylene // *Polymer Degradation and Stability*. Jan. 2003. V. 81 (2). P. 367—373.
7. *Saifullah Abu, Thomas Ben, Cripps Robert, Tabeshfar Kamran, Wang Lei, Muryn Christopher*. Fracture toughness of rotationally molded polyethylene and polypropylene // *Polymer Engineering & Science*. Jan. 2018. V. 58 (1). P. 63—73.
8. *Mendes A.A., Cunha A.M., Bernardo C.A.* Study of the degradation mechanisms of polyethylene during reprocessing // *Polymer Degradation and Stability*. Jun. 2011. V. 96 (6). P. 1125—1133.
9. *Cuadri A.A., Martin-Alfonso J.E.* The effect of thermal and thermo-oxidative degradation conditions on rheological, chemical and thermal properties of HDPE // *Polymer Degradation and Stability*. Jul. 2017. V. 141. P. 11—18.
10. *Gulmine J.V., Janissek P.R., Heise H.M., Akcelrud L.* Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering // *Polymer Degradation and Stability*. 2003. V. 79 (3). P. 385—397.
11. *Cramez Maria Clara, Oliveira Maria Jovita, Fakirov Stoyko, Crawford Robert James, Apostolov Anton Atanassov, Krumova Marina*. Rotationally molded polyethylene: Structural characterization by x-ray and microhardness measurements // *Advances in Polymer Technology*. 2001. V. 20 (2). P. 116—124.
12. *Hiejima Yusuke, Kida Takumitsu, Takeda Kento, Igarashi Toshio, Nitta Koh-hei*. Microscopic structural changes during photodegradation of low-density polyethylene detected by Raman spectroscopy // *Polymer Degradation and Stability*. Apr. 2018. V. 150. P. 67—72.
13. *Bray Don E., Vela John, Al-Zubi Raed S.* Stress and Temperature Effects on Ultrasonic Properties in Cross-Linked and High Density Polyethylene // *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2005. V. 127 (3). P. 220.

14. *Jia Dawei, Bourse G., Chaki S., Lacrampe M.F., Robin C., Demouveau H.* Investigation of Stress and Temperature Effect on the Longitudinal Ultrasonic Waves in Polymers // *Research in Nondestructive Evaluation*. Jan. 2014. V. 25 (1). P. 20—29.
 15. *Adachi Keiichiro, Harrison Gilroy, Lamb John, North Alastair M., Pethrick Richard A.* High frequency ultrasonic studies of polyethylene // *Polymer*. 1981. V. 22 (8). P. 1032—1039.
 16. *Tanaka Akira, Nitta K., Onogi S.* Ultrasonic velocity and attenuation of polymeric solids under oscillatory deformation: Apparatus and preliminary results // *Polymer Engineering and Science*. Aug. 1989. V. 29 (16). P. 1124—1130.
 17. *Sahnoune Abdelhadi, Tatibouet Jacques, Gendron Richard, Hamel André, Piché Luc.* Application of Ultrasonic Sensors in the Study of Physical Foaming Agents for Foam Extrusion // *Journal of Cellular Plastics*. Sep. 2001. V. 37 (5). P. 429—454.
 18. *Gomes F.P.C., Eng B.* Nonlinear ultrasonics for in-line quality monitoring of polymer processing methods // *McMaster University*. Oct. 2018. P. 21—100.
-

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОБЪЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ ПО ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

© 2021 г. А.А. Дедкова^{1,*}, И.В. Флоринский^{2,**}, Е.Э. Гусев¹, Н.А. Дюжев¹, М.Ю. Фомичев¹, М.Ю. Штерн¹

¹Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия
124498 Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1

²Институт математических проблем биологии РАН — филиал ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН»,
Россия 142290 Московская обл., г. Пуцино, ул. проф. Виткевича, 1
E-mail: *dedkova@ckp-miet.ru; **iflor@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2021; после доработки 10.09.2021
Принята к публикации 11.10.2021

Разработана методика выявления и анализа объемных поверхностных дефектов, в основе которой лежит геоморфометрическое моделирование, в частности — анализ моделей и карт ряда морфометрических величин (минимальная кривизна, максимальная кривизна, средняя кривизна, гауссова кривизна, несферичность и др.), рассчитываемых по цифровым моделям рельефа поверхности. Методика позволяет выявлять области расположения отдельных объемных дефектов (трещин, отслоений пленок, отклонений формы и др.), определять форму и размеры как самих дефектов, так и видоизмененных областей рядом с ними, исследовать паттерны их распределения. Работоспособность методики продемонстрирована на примере дефектов на сборках пластин кремний—стекло и кремний—кремний, на растрескавшейся пленке Ni—W. Методика может быть перспективной для контроля качества изготовления и диагностики поврежденных различных деталей, в частности изделий микроэлектроники.

Ключевые слова: поверхность, рельеф, топография, кривизна, деформация, кремниевая пластина, оптическая профилометрия, дефект, геоморфометрия, цифровая модель рельефа, ЦМР, трещина, растрескивание, шероховатость.

DOI: 10.31857/S0130308221110051

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение и анализ дефектов различных объектов является распространенной задачей во многих отраслях: в металлургии [1—3], микроэлектронике [4—8], строительстве и архитектуре [9], атомной энергетике [10, 11], сельском хозяйстве [12] и др.

Своевременное выявление и определение характеристик дефектов необходимо для межоперационного контроля в процессе изготовления структур, для контроля работоспособности готовых изделий в процессе их эксплуатации, для проведения подробного анализа напряженно-деформированного состояния близи сформированного дефекта. Детальная информация как о самом дефекте, так и об областях рядом с ним может быть востребована различными специалистами.

Для исследования и контроля дефектов широко используются оптические методы [3, 6, 10, 13—19]. В результате применения таких методов может быть сформирована цифровая модель рельефа (ЦМР) поверхности исследуемого объекта. Как правило, приборы для формирования ЦМР снабжены программным обеспечением, позволяющим визуализировать распределение $z(x, y)$. Однако подробный анализ дефектов непосредственно по ЦМР часто затруднен в связи со сложной формой исследуемых объектов [19—23].

В статье рассмотрена методика, в которой для измерения и контроля используются не собственно ЦМР (матрица значений $z(x, y)$), а геоморфометрическое моделирование, в частности — цифровые модели морфометрических величин, рассчитываемых по ЦМР как функции первых и

вторых частных производных $p = \frac{\partial z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z}{\partial y}$, $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$, $t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$, $s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$. Геоморфометрия — научная дисциплина, предметом которой является математическое моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между ним и другими компонентами геосистем [24, 25]. Список наиболее часто используемых морфометрических величин: крутизна склона (G), экспозиция склона (A), горизонтальная кривизна (k_h), вертикальная кривизна (k_v), разностная кривизна (E), избыточная горизонтальная кривизна (k_{he}), избыточная вертикальная кривизна (k_{ve}), аккумуляционная кривизна (K_a), кольцевая кривизна (K_r), минимальная кривизна (k_{\min}), максимальная кривизна (k_{\max}), средняя кривизна (H), гауссова кривизна (K), несферичность (M) и др. Каждая из морфометрических

величин имеет свой физико-математический смысл. Их определения, формулы и интерпретации описаны в [25, 26]. Морфометрические величины рассчитываются в каждой точке поверхности (кроме особых точек) и, таким образом, характеризуют особенности геометрии окрестности каждой точки поверхности.

Целью статьи является ознакомление читателей с возможностями геоморфометрии для анализа и визуализации особенностей рельефа поверхности вблизи дефектов.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Объектами исследования были два типа структур.

Первый: сборки двух пластин, соединенных при помощи адгезивного слоя (специального клея) на установке временного бондинга [29]. Дефекты были вызваны паразитными затеканиями жидкостей, повреждениями тонкой пленки слоя Si (ее отслоением), неравномерным совмещением пластин и их изгибом. Исследовали:

- сборку из стекла толщиной 500 мкм и кремния толщиной 140 мкм, оба — диаметром 150 мм;
- сборку из двух кремниевых пластин различного диаметра: 100 мм и 150 мм.

Стоит отметить, что отслаивание пленок, проявляющееся в виде одиночных трещин или вспучивания, является типичным дефектом для систем пленка—подложка [7, 30—36].

Второй тип исследуемых структур: пленка Ni—W на подложке теллурида висмута. Анализировали область растрескивания пленки. Пленка Ni—W была сформирована методом гальванического осаждения из щелочного электролита на базе $\text{NiSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, NaOH, $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4OH 25%, H_2WO_4 , при температуре 50 °С и плотности тока 10 А/дм².

Исследуемые структуры являлись специально подобранными бракованными изделиями.

Для построения ЦМР поверхности использовался оптический профилометр Veeco Wyko NT 9300, реализующий метод вертикальной сканирующей интерферометрии [19, 20, 27, 28].

Были получены и проанализированы шесть ЦМР: области с крестообразным дефектом на сборке кремний—стекло размером 9,5×10,4 мм (разрешение ЦМР 0,0287 мм) и размером 3,3×123,1 мм (разрешение ЦМР 0,1148 мм) — рис. 1; верхней и нижней пластин сборки кремний—кремний различного диаметра (разрешение ЦМР 0,1148 мм) — рис. 2; области с протяженными дефектами на сборке кремний—стекло размером 3,4×4,6 мм (разрешение ЦМР 0,0072 мм) — рис. 3; области растрескавшейся пленки Ni—W размером 3,4×4,6 мм (разрешение ЦМР 0,0072 мм) — рис. 4.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА

Для геоморфометрического моделирования (анализа ЦМР) поверхности исследуемых образцов был применен универсальный спектрально-аналитический метод моделирования рельефа на основе ортогональных разложений высокого порядка с использованием полиномов Чебышева I рода с последующим суммированием Фейера [37]. Метод предназначен для обработки регулярных ЦМР в рамках единой схемы, включающей глобальную аппроксимацию ЦМР, генерализацию, сглаживание и подавление шума в ЦМР, а также расчет морфометрических величин на основе аналитического вычисления частных производных различного порядка. Аппроксимация характеризуется монотонной сходимостью и возможностью быстрого глубокого разложения функции высоты. Также в ряде случаев использовался расчет кривизн напрямую через первые и вторые частные производные [38] после сглаживания ЦМР с помощью универсального спектрально-аналитического метода [37].

В результате геоморфометрического моделирования были получены цифровые модели и карты k_{\min} , k_{\max} , H , K , M поверхности исследуемых образцов (рис. 1б, в, е—з; рис. 2; рис. 3в, г; рис. 4б—д).

При анализе рассчитанных моделей морфометрических величин учитывались известные из дифференциальной геометрии и геоморфометрии закономерности [25, 26]:

- знак гауссовой кривизны K позволяет анализировать локальную форму поверхности: выделять эллиптические ($K > 0$), седловые ($K < 0$) и параболические точки ($K = 0$);

- знаки главных кривизн k_{\min} и k_{\max} позволяют выделять локальные выпуклые и вогнутые элементы рельефа: $k_{\max} > 0$ соответствуют протяженным выпуклым областями поверхности, $k_{\max} < 0$ — локальным вогнутым элементам рельефа («впадинам»), $k_{\min} > 0$ соответствуют локальным выпуклым участкам («бугоркам»), $k_{\min} < 0$ — протяженным вогнутым участкам поверхности;

- по знаку средней кривизны поверхности H можно анализировать локальную форму поверхности. Для выпуклых локальных участков поверхности — $H > 0$, для вогнутых — $H < 0$, для локальных участков уплощения — $H = 0$;
- несферичность M показывает, насколько форма элемента поверхности отклоняется от сферической (для сферы $M = 0$).

Расположение и размеры паттернов рельефа, отображаемых на картах кривизн? — существенно различается в зависимости от используемой глубины разложения исходной ЦМР (т.е. от количества коэффициентов разложения (n), используемого при восстановлении аппроксимированной ЦМР). Чем меньше значение n , тем сильнее степень генерализации (сглаживания) ЦМР. Карты морфометрических величин, рассчитанные при существенно отличающихся (например, на порядок) значений n , позволяют выявлять паттерны рельефа, которые относятся к разным уровням пространственной иерархии (масштаба).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены карты рельефа и рассчитанных моделей морфометрических величин для поверхности сборки кремний—стекло вблизи расположения крестообразного дефекта. Для оценки

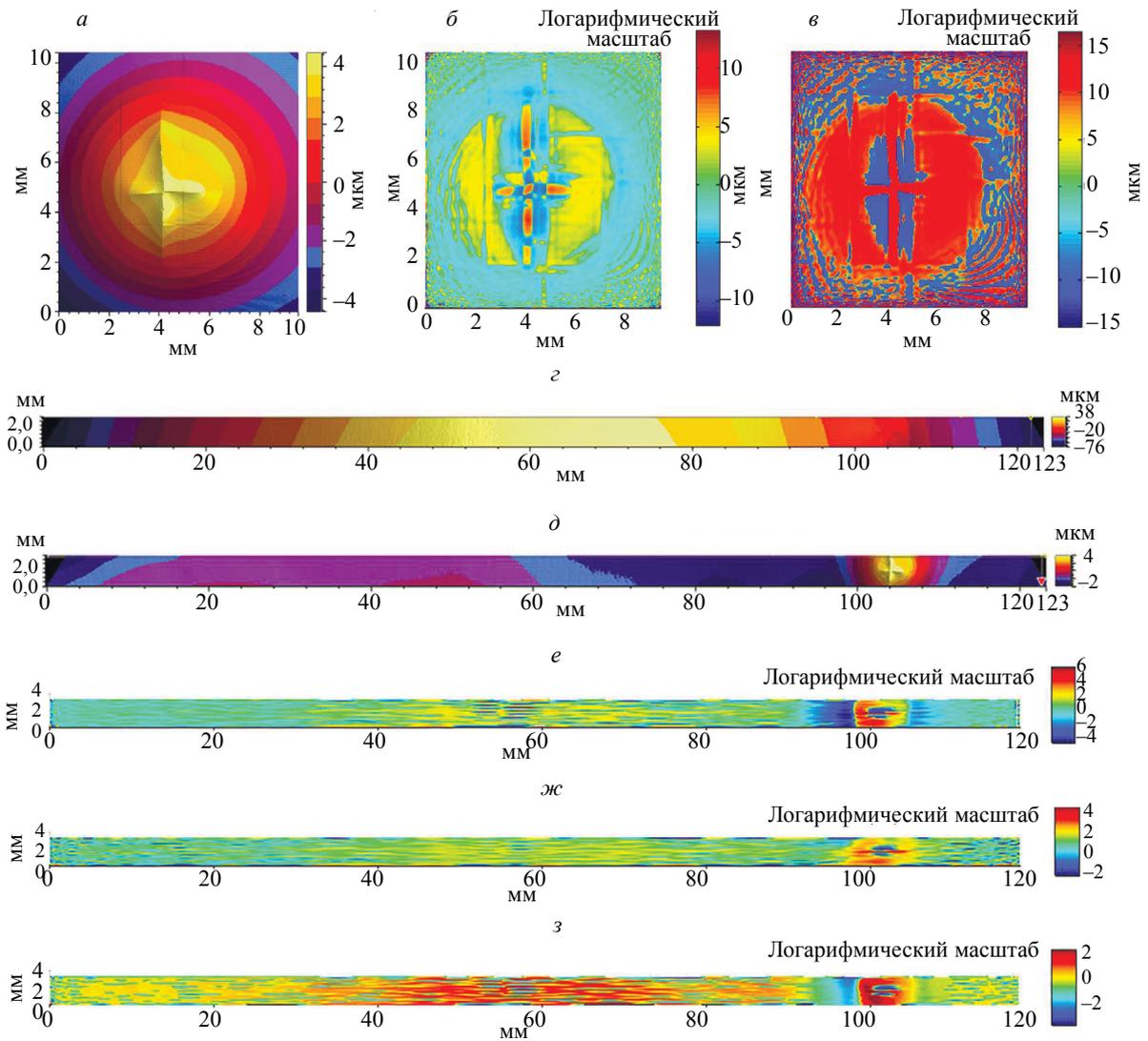


Рис. 1. Исходный (а, з) и модифицированный (д) рельефы поверхности области с дефектом сборки кремний—стекло; рассчитанные по ЦМР морфометрические величины: гауссова кривизна K (б, е), средняя кривизна H (в, ж), минимальная кривизна k_{\min} (з). Размер области анализа порядка 10×10 мм (а—в), 4×120 мм (з—з).

области размером $3,3 \times 123,1$ мм также приведена карта рельефа этого образца после удаления трендовой составляющей формы (рис. 1д) — сферы. Преимущественно, область самого дефекта («трещин») во всех случаях отображается красным цветом (см. рис. 1б, в, е—з — высокие положительные значения), что соответствует локальной выпуклой форме поверхности. При этом присутствуют области с $K < 0$ (см. рис. 1б), что означает наличие локальных седловых участков. Непосредственно примыкающие к трещине области на расстоянии от центра дефекта до 1,7 мм отображены синим цветом (см. рис. 1б, в, е—з — большие отрицательные значения), что соответствует вогнутой седловой форме поверхности. Дальше от центра трещины располагаются области положительной кривизны (см. рис. 1б, в, е—з) протяженностью порядка 1,4 мм, соответствующие выпуклой форме поверхности. А еще дальше от дефекта — наблюдаются области $K < 0$, протяженностью порядка 6,5 мм. Анализ позволил выявить, что размер затронутой деформацией области существенно превышает видимый невооруженным глазом размер дефекта, определить ее качественные особенности. Вдоль меньшей стороны дефекта визуальная длина составила порядка 2 мм, реальная общая протяженность деформированной области (вспучивание пленки) — порядка 18—20 мм (что хорошо видно и на рис. 1д, и на рис. 1е—з). Анализ, проведенный с использованием геоморфометрического моделирования (см. рис. 1б, в, е—з), позволяет получать гораздо более подробную информацию о пространственных характеристиках дефекта, чем непосредственно по ЦМР (см. рис. 1а, з, д).

Использование методов геоморфометрии для анализа дефектов по площади поверхности сборки кремний—кремний показано на рис. 2. С помощью карт главных кривизн проанализирован характер расположения дефектов соединения на верхней пластине и особенности изменения формы нижней пластины. В частности, поверхность верхней пластины содержит множество локальных вогнутых областей (отрицательные k_{\max} , рис. 2а) и протяженную разветвленную вогнутую область (отрицательные k_{\min} , рис. 2б). При проведении генерализации ЦМР с большим коэффициентом разложения n определено расположение локальных вогнутых областей меньшего размера. На картах главных кривизн нижней пластины видна слегка вогнутая область в ее центре (левее базового среза верхней пластины).

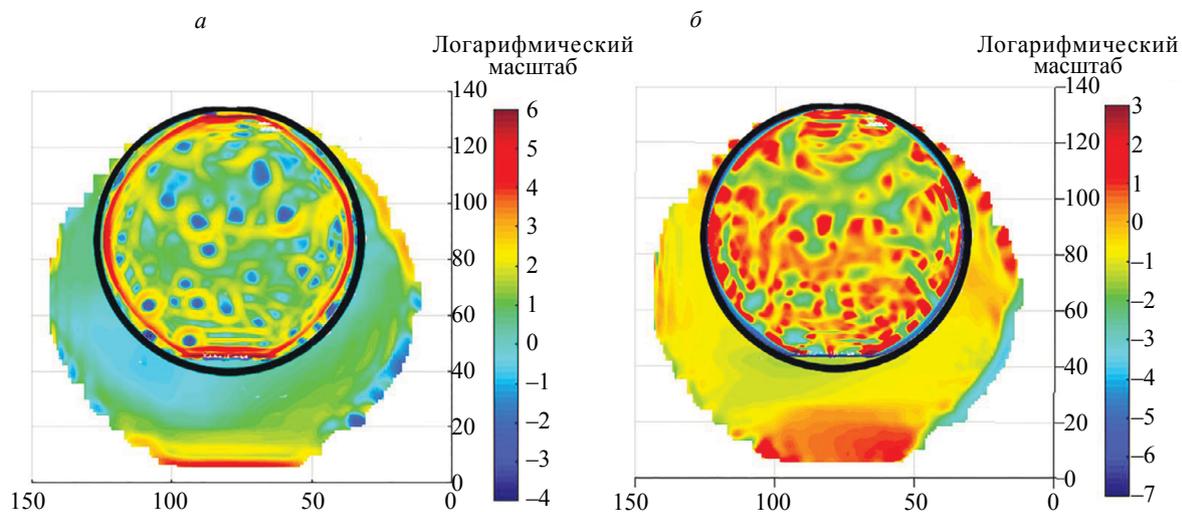


Рис. 2. Рассчитанные по ЦМР морфометрические величины для двух соединенных кремниевых пластин диаметром 100 мм (сверху) и 150 мм (снизу): максимальная кривизна k_{\max} (а), минимальная кривизна k_{\min} (б). Черной окружностью показана граница соединения двух ЦМР, проходящая по периметру верхней пластины диаметром 100 мм.

Анализ карт морфометрических величин показал, что потенциально полезная возможность применения методов геоморфометрии — это выявление расположения протяженных дефектов, которые слабо различимы на исходной карте рельефа поверхности, построенной непосредственно по ЦМР. Хотя при достаточно большом опыте проведения исследований и возможности использовать 3D-отображение эти протяженные дефекты могут быть обнаружены (рис. 3а), это требует мастерства оператора. Вместе с тем на картах морфометрических величин хорошо видны расположение и направление протяженных областей (как выпуклой, так и вогнутой формы). Авторы пола-

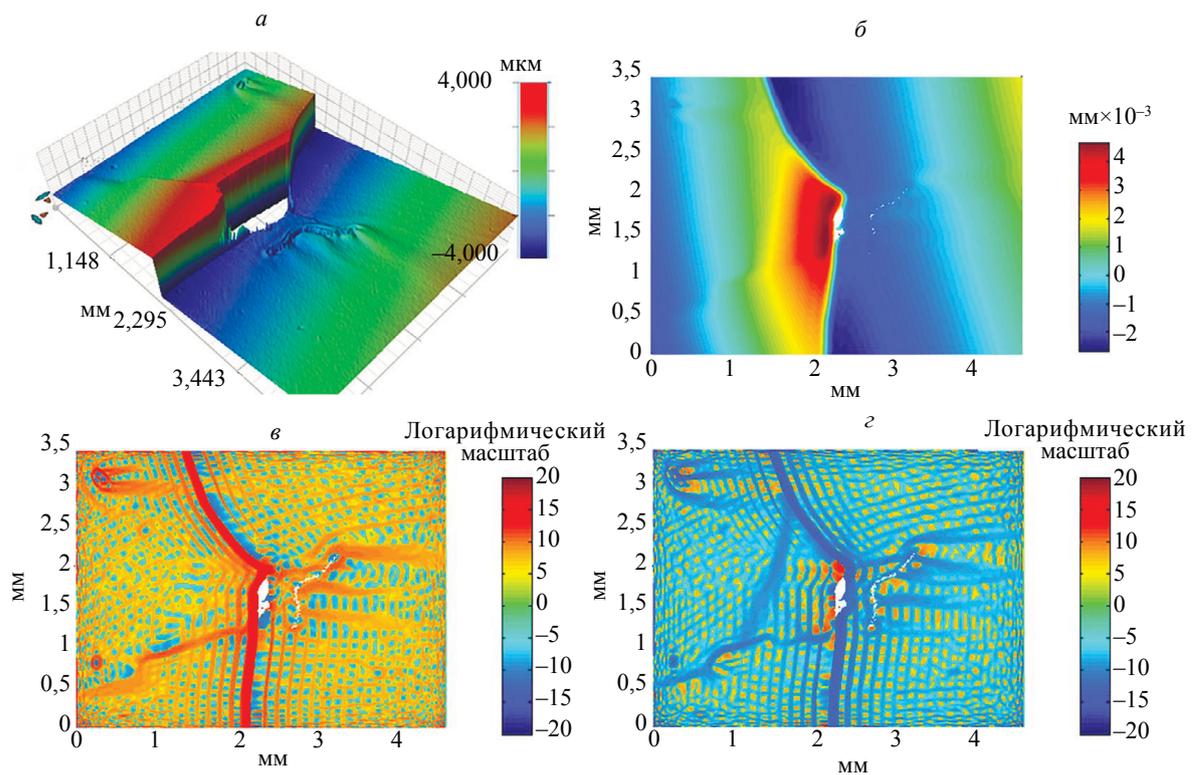


Рис. 3. Рельеф поверхности области с трещинами сборки кремний—стекло в 3D (а) и 2D (б); рассчитанные по ЦМР морфометрические величины: максимальная кривизна k_{\max} (в), минимальная кривизна k_{\min} (г).

гают, что использование методов геоморфометрии позволит не только более подробно анализировать такого типа дефекты, но и выявлять их на порядок раньше, чем это можно было бы сделать, используя только ЦМР.

Использование геоморфометрического моделирования для выявления протяженных дефектов, слабо различимых на ЦМР поверхности, показано на рис. 3 для сборки кремний—стекло. На рис. 3в по наибольшему значению k_{\max} видны протяженные выпуклые области, а на рис. 3г по наименьшему k_{\min} — протяженные вогнутые, в комплексе составляющие протяженный дефект.

Анализ отслоившейся и растрескавшейся пленки Ni—W показан на рис. 4. Ближе к левой верхней части изображений хорошо видны границы отдельные областей растрескивания (рис. 4б—г). Такой подход к анализу и визуализации дефектов удобен для определения размеров отдельных квазипolygonальных структур или направления их ребер, что может быть важно для отдельных приложений [39].

Описанные методы могут быть полезны при анализе изменения исследуемого объекта с течением времени, в зависимости от приложенных воздействий, например, мембран [16, 38, 40, 41]. Геоморфометрическое моделирование может использоваться для исследования паттернов распределения дефектов и последующего построения физических моделей деградации объектов. Примененный нами математический аппарат, по всей видимости, может быть применен для анализа цифровых моделей данных, полученных на основе других физических принципов [42—45].

ВЫВОДЫ

В статье показаны:

- возможность исследования размеров, расположения и характерных особенностей отдельных дефектов (неоднородностей рельефа) по ЦМР с использованием методов геоморфометрии (в том числе на объектах сложной формы) по картам гауссовой, средней, максимальной и минимальной кривизны и других морфометрических величин;

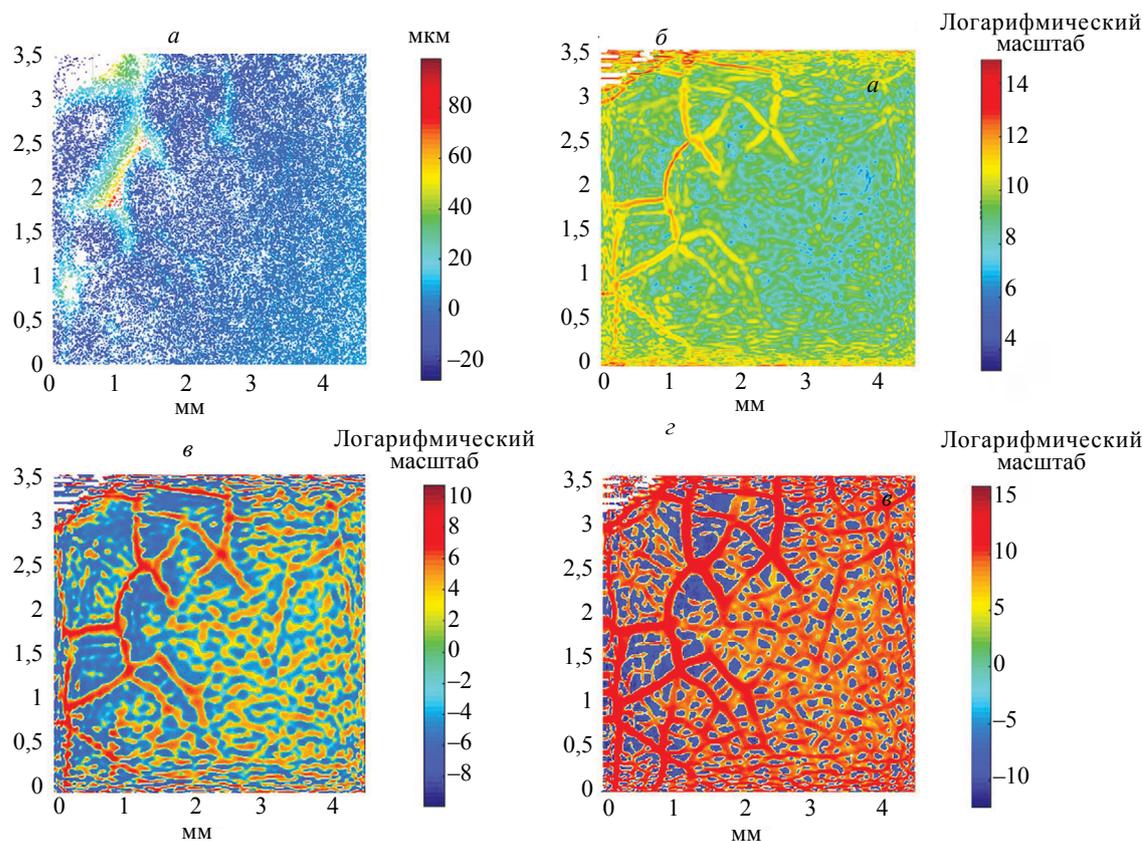


Рис. 4. Рельеф поверхности области растрескивания пленки Ni—W (а); рассчитанные по ЦМР морфометрические величины: несферичность M (б), средняя кривизна H (в), максимальная кривизна k_{\max} (г).

- возможность использования методов геоморфометрии для анализа расположения протяженных дефектов (в том числе для раннего их выявления), мелких выпуклых и вогнутых областей поверхности, областей растрескивания и др.;

- повышение наглядности и информативности представляемых данных при использовании методов геоморфометрии.

Авторы полагают, что описанная методика может быть полезна для более точного межоперационного контроля в процессе изготовления различных изделий, для визуализации дефектов на ранних стадиях их развития, а также для их подробного анализа.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» НИУ МИЭТ в рамках реализации программы ЛИЦ «Доверенные сенсорные системы» (Договор № 009/20 от 10.04.2020).

Работа соавторов А.А. Дедковой, Е.Э. Гусева и Н.А. Дюжева была проведена при финансовой поддержке Минкомсвязи России и АО «РВК» (Идентификатор соглашения о предоставлении субсидии — 0000000007119P190002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев О.А., Шлеенков С.А., Гусев О.А., Шлеенков А.С. Выявление поверхностных микротрещин в металлических изделиях с помощью возбуждения высокочастотными вихревыми токами и визуализацией инфракрасной камерой // Дефектоскопия. 2016. № 8. С. 47—54.
2. Сташков А.Н., Сомова В.М., Корх Ю.В., Огнева М.С., Сташкова Л.А., Сажина Е.Ю. Магнитная и акустическая методики определения изменения фазового состава и динамики разрушения пластически деформированной бескобальтовой мартенситно-старееющей стали // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 54—68.
3. Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Соковиков М.А., Билалов Д.А., Наймарк О.Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 2. С. 116—126. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.07

4. Золотов Д.А., Бузмаков А.В., Елфимов Д.А., Асадчиков В.Е., Чуховский Ф.Н. Возможность выявления пространственного расположения одиночных дислокаций методом топо-томографии на лабораторных установках // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 1. С. 12—16. DOI: 10.7868/S0023476117010271
5. Клуникова Ю.В., Гусев Е.Ю. Исследование термоупругих напряжений в пленках поликристаллического кремния на подложке сапфира, полученных плазмохимическим осаждением // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 2 (196). С. 16—25. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-2-16-25
6. Сенько С.Ф., Зеленин В.А. Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9. № 1. С. 74—84. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84
7. Телятник Р.С., Осипов А.В., Кукушкин С.А. Релаксация деформаций несоответствия за счет пор и отслоений и условия образования дислокаций, трещин и гофров в эпитаксиальной гетероструктуре AlN(0001)/SiC/Si(111) // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 1. С. 153—162.
8. Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы периодической деформации системы «пленка-подложка» под действием сжимающих напряжений // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 3. С. 23—32.
9. Глушков С.П., Соловьев Л.Ю., Борисовская Н.Е. Выявление дефектов в усиленных композиционными материалами конструкциях методом инфракрасной термографии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4 (35). С. 36—42.
10. Будаев В.П., Мартыненко Ю.В., Химченко Л.Н., Житлухин А.М., Климов Н.С., Питтс Р.А., Линке И., Базылев Б., Белова Н.Е., Карпов А.В., Коваленко Д.В., Подковыров В.Л., Ярошевская А.Д. Рекристаллизация и изменение рельефа поверхности стали под воздействием излучения в плазменных разрядах большой мощности // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 11. С. 1017—1032. DOI: 10.7868/S0367292113110036
11. Финогенов Л.В., Завьялов П.С., Карлин В.Э., Хакимов Д.Р. Высокопроизводительный оптико-электронный контроль боковой поверхности топливных таблеток с определением глубины дефектов // Датчики и системы. 2016. № 7 (205). С. 53—59.
12. Будаговская О.Н., Будаговский А.В. Лазерная дефектоскопия плодов // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 63—73.
13. Карева Н.Т., Чунгаков Д.Т., Заварцев Н.А. Исследование трещинообразования при изготовлении выпускного клапана ДВС // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2019. Т. 19. № 2. С. 44—52. DOI: 10.14529/met190205
14. Алферова Е.А., Лычагин Д.В. Деформационный рельеф в кристаллах как способ релаксации напряжений // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 2 (26). С. 155—159. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-155-159
15. ГОСТ Р 58399—2019.
16. Баженов С.Л., Разумовская И.В., Ковалец Н.П., Бедин С.А. Образование отслоений в металлическом покрытии трековой мембраны // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488. № 1. С. 44—46. DOI: 10.31857/S0869-5652488144-46
17. Ol't Yu., Maksarov V.V., Makhov V.E. Intelligence systems for quality assessment of threaded surfaces and flaw monitoring based on digital light field recording // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 915—926. DOI: 10.1134/S1061830920110054 [Ольт Ю., Максаров В.В., Махов В.Е. Интеллектуальные системы оценки качества обработки резьбовых поверхностей и контроля дефектов на основе цифровой регистрации светового поля // Дефектоскопия. 2020. № 11. С. 46—57. DOI: 10.31857/S0130308220110056].
18. Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Роголин В.Е., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Каплунов И.А., Иванова А.И. Модификация поверхности кремния при воздействии излучения наносекундного ультрафиолетового лазера // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2020. № 12. С. 628—636. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.628
19. Djuzhev N.A., Gusev E.E., Dedkova A.A., Makhboroda M.A. Non-destructive method of surface mapping to improve accuracy of mechanical stresses measurements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 289, P. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012007
20. Ardigo M.R., Ahmed M., Besnard A. Stoney formula: Investigation of curvature measurements by optical profilometer // Advanced Materials Research. 2014. V. 996. P. 361—366. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.996.361
21. Kim J.H., Chung K. Thermo-mechanical constitutive equations for glass and its numerical formulation for warpage analysis of silicon-glassmultilayered structure // International Journal of Plasticity. 2015. V. 75. P. 204—225. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.12.006
22. Грибко В.В., Маркелов А.С., Трушин В.Н., Чупрунов Е.В. Управление кривизной поверхности дифракционных элементов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 5. С. 28—32. DOI: 10.7868/S0207352817050079
23. Якимчук И.В., Бузмаков А.В., Андреев А.В., Асадчиков В.Е. Исследование качества вогнутых сферических поверхностей скользящим пучком рентгеновского излучения // Кристаллография. 2012. Т. 57. № 2. С. 341—344.
24. Hengl T., Reuter H.I. (Eds.) Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 796 p.

25. *Florinsky I.V.* Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology / 2nd ed. Amsterdam: Elsevier / Academic Press, 2016. 486 p.
26. *Florinsky I.V.* An illustrated introduction to general geomorphometry // *Progress in Physical Geography*. 2017. V. 41. No. 6. P. 723—752. DOI: 10.1177/0309133317733667
27. *Jiang C., Kilcullen P., Liu X., Ozaki T., Liang J.* Three-dimensional structured light profilometry using a bandwidth-limited projector // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 10932. P. 109320K. DOI: 10.1117/12.2510145
28. *Mao C.-L., Lu R.-S., Dong J.-T., Zhang Y.-Z.* Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection // *Jiliang Xuebao/Acta Metrologica Sinica*. 2018. V. 39 (5). P. 628—640. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2018.05.07
29. *Fomichev M.Y., Makhboroda M.A., Djuzhev N.A., Dedkova A.A., Gusev E.E.* Development of adhesive wafer bonding technology / *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*. P. 2558—2562. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396080
30. *Ярцев В.И., Демьянов Б.Ф., Плотников В.А., Макаров С.В., Соломатин К.В.* Релаксационная структура и внутренние напряжения в тонких углеродных пленках // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2015. Т. 12. № 4. С. 477—481.
31. *Абрамян А.К., Бессонов Н.М., Индейцев Д.А., Мочалова Ю.А., Семенов Б.Н.* Влияние локализации колебаний на отслоение пленки от основания // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2011. № 1. С. 8—16.
32. *Кургузов В.Д.* Моделирование отслоения тонких пленок при сжатии // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2014. Т. 7. № 1. С. 91—99. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.10
33. *Кургузов В.Д., Демешкин А.Г.* Экспериментальное и теоретическое исследование потери устойчивости узких тонких пластин на упругом основании при сжатии // *Прикладная механика и техническая физика*. 2016. Т. 57. № 3 (337). С. 121—128. DOI: 10.15372/PMTF20160313
34. *Waters P.* Stress Analysis and Mechanical Characterization of Thin Films for Microelectronics and MEMS Applications / Ph.D. Thesis. Department of Mechanical Engineering College of Engineering University of South, Florida, 2008. 197 p.
35. *Evans A.G., Hutchinson J.W.* The thermomechanical integrity of thin films and multilayers // *Acta Metallurgica et Materialia*. 1995. V. 43. No. 7. P. 2507—2530. DOI: 10.1016/0956-7151(94)00444-M.
36. *Hutchinson J.W., Suo S.* Mixed mode cracking in layered materials // *Advances in applied mechanics*. 1992. V. 29. P. 63—191. DOI: 10.1016/S0065-2156(08)70164-9
37. *Florinsky I.V., Pankratov A.N.* A universal spectral analytical method for digital terrain modeling // *International Journal of Geographical Information Science*. 2016. V. 30. No. 12. P. 2506—2528. DOI: 10.1080/13658816.2016.1188932
38. *Machado G., Favier D., Chagnon G.* Membrane curvatures and stress-strain full fields of axisymmetric bulge tests from 3D-DIC measurements. Theory and validation on virtual and experimental results // *Experimental Mechanics*. 2012. V. 52. P. 865—880. DOI: 10.1007/s11340-011-9571-3
39. *Воронин А.С., Иванченко Ф.С., Хартов С.В.* Создание оптически прозрачного проводящего покрытия на основе самоорганизованного шаблона // *Решетневские чтения*. 2014. Т. 1. С. 459—461.
40. *Dedkova A.A., Dyuzhev N.A., Gusev E.E., Shtern M.Y.* Fast nondestructive technique for analyzing deflection of membranes located on the substrate // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 5. P. 452—459. DOI: 10.1134/S1061830920050046 [*Дедкова А.А., Дюжев Н.А., Гусев Е.Э., Штерн М.Ю.* Оперативная неразрушающая методика анализа прогиба мембран, расположенных на пластине // *Дефектоскопия*. 2020. № 5. С. 52—59. DOI: 10.31857/S0130308220050073].
41. *Дедкова А.А., Глаголев П.Ю., Гусев Е.Э., Дюжев Н.А., Киреев В.Ю., Лычев С.А., Товарнов Д.А.* Особенности деформирования круглых тонкопленочных мембран и экспериментальное определение их эффективных характеристик // *Журн. технической физики*. 2021. Т. 91. № 10. С. 1454—1465. DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51357.121-21
42. *Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А.* Электротоковая тепловая дефектоскопия металлических пластин // *Письма в Журн. технической физики*. 2017. Т. 43. № 19. С. 64—70. DOI: 10.21883/PJTF.2017.19.45083.16769
43. *Башевская О.С., Бушуев С.В., Подураев Ю.В., Мельниченко Е.А., Щербаков М.И., Гарсков Р.* Применение инфракрасной термографии для оценки линейных размеров подповерхностных дефектов // *Измерительная техника*. 2017. № 5. С. 34—37.
44. *Булъчев О.А., Шлеенков С.А., Лисиенко В.Е., Шлеенков А.С.* Исследование возможности обнаружения поверхностных дефектов в ферромагнитных изделиях пироэлектромагнитным методом // *Дефектоскопия*. 2010. № 4. С. 50—57.
45. *Ужегова Н.И., Свистков А.Л.* Многоуровневый анализ рельефа поверхности образца, полученного методами атомно-силовой микроскопии // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2016. Т. 9. № 3. С. 366—374. DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.3.30

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СТАЛЬНЫХ ТРОСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИМИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

© 2021 г. Бин Ли^{1,*}, Цзювэй Чжан^{1,**}, Цихан Чен¹

¹Хэнаньский научно-технологический университет, Лоян 471023, Китай
E-mail: *hnkjdxlb@163.com; **juweizhang@haust.edu.cn

Поступила в редакцию 05.09.2021; после доработки 24.09.2021

Принята к публикации 24.09.2021

Для решения проблем, связанных с недостаточным шумоподавлением сигнала и низкой скоростью распознавания при контроле тросов методом магнитного поля рассеяния (МПП), предлагается MSVDW-алгоритм, который использует комбинацию медианной фильтрации, сингулярного разложения (СР) и вейвлет-преобразования для шумоподавления измеренных трехмерных МПП-сигналов. Затем псевдоцвет применяется для улучшения изображения. После изображения сегментируется с использованием метода максимума модуля. Моменты цвета извлекаются из изображений и используются в качестве входных данных для метода опорных векторов, оптимизированного алгоритмом роя частиц (ОРЧ-МОВ), для обучения и распознавания. Результаты экспериментов показывают, что алгоритм уменьшения шума, предложенный в этой статье, эффективно снижает шум сигнала рассеяния, изображение в ложных цветах повышает количество информации об изображении дефекта, а алгоритм ОРЧ-МОВ значительно улучшает быстроту распознавания дефектов.

Ключевые слова: стальной трос, сингулярное разложение, вейвлет-преобразование, усиление псевдоцвета, метод роя частиц, метод опорных векторов.

DOI: 10.31857/S0130308221110063

1. ВВЕДЕНИЕ

Тросы являются распространенными и важными несущими деталями различных конструкций, тесно связанных с нашей повседневной жизнью. Он широко используется в транспорте, горнодобывающей промышленности, туризме, транспорте, металлургии и строительстве, говоря конкретнее, в шахтных подъемниках, лифтах, канатных дорогах, крупном подъемном оборудовании и др. [1]. Однако длительная эксплуатация стальных тросов неизбежно приводит к износу и усталости металла троса, образованию ржавчины, к деформациям формы, обрывам самого троса и так далее. Такие дефекты приводят к снижению предельной нагрузки, которую может выдерживать трос, что может привести к опасным авариям, и, как следствие, к огромным экономическим потерям и человеческим жертвам. Поэтому регулярный контроль сохранности тросов очень важен.

С момента изобретения стальных тросов люди активно искали способы обеспечить их безопасную эксплуатацию. На сегодняшний день для контроля тросов разработано множество методов. В настоящее время основными методами неразрушающего контроля являются метод ультразвукового контроля [2], радиоволновой метод, инфракрасный метод контроля [3], метод акустической эмиссии, метод электромагнитного контроля [4] и так далее. Среди них наиболее широко используется метод электромагнитного контроля, поскольку он имеет преимущества в низкой стоимости, высокой точности, простоте принципа и подходит для тросов со сложной структурой. В настоящее время электромагнитный контроль в основном включает магнитопорошковый контроль, контроль ультракороткими волнами, контроль вихревыми токами [5], метод рассеяния потока и метод магнитной памяти [6]. Метод МПП основывается на возникающем рассеянии магнитного поля при намагничивании троса. Поскольку внутренние и поверхностные дефекты формируют искажения магнитного поля на поверхности троса, дефекты количественно идентифицируются путем измерения МПП [7]. Методы электромагнитного контроля можно разделить по способу наведения магнитного поля в объекте контроля на два типа: намагничивание посредством катушки [8, 9] и намагничивание посредством постоянного магнита [10]. В устройствах, использующих в качестве намагничивающего устройства П-образный электромагнит с двумя намотанными катушками, магнитные поля с разной напряженностью генерируются изменением значения электрического тока в катушках. Устройства, использующие в качестве намагничивающего устройства постоянные магниты, обычно выполнены в виде подковы, т.е. проектируются U-образные намагничивающие устройства. Симметричная конструкция используется для обеспечения равномерного намагничивания и магнитного насыщения троса. При повреждении троса возникает поле утечки [11, 12]. После намагничивания магнитное поле рассеяния троса обнаруживают и идентифицируют.

Пространственный МПР-сигнал имеет три компонента: радиальную, угловую и осевую. Каждая компонента содержит большое количество информации о дефектах. Среди них интенсивность сигнала осевой компоненты в направлении намагничивания стального каната и радиальная компонента сигнала вдоль радиального направления стального троса выше, а эффективность обнаружения дефектов лучше. Следовательно, при МПР-контроле чаще выбирали эти два параметра, а не осевую компоненту. Например, гигантская матрица магниторезистивных датчиков, разработанная [13], предназначена для сбора сигнала радиальной компоненты рассеяния. Он использует алгоритм вейвлет-фильтрации с учетом сжатия для уменьшения шума и достижения лучших результатов. Чтобы еще больше улучшить эффект снижения шума, был разработан алгоритм фильтрации, сочетающий преобразование Гильберта—Хуанга и фильтрацию с учетом сжатия для подавления системного шума [14]. Но недостатком обоих алгоритмов является длительное время вычислений. В [15] устройство контроля было разработано на основе характеристик распределения магнитного поля рассеяния дефекта эквивалентной модели магнитного диполя и влияния различных параметров дефекта на распределение магнитного поля рассеяния с использованием 30 датчиков Холла, равномерно распределенных вокруг окружности троса для сбора информации о наличии магнитного поля рассеяния. Однако отношение сигнал/шум (ОСШ) сигнала, собираемого устройством, низкое из-за эффекта низкой чувствительности датчиков Холла. Четырехканальная матрица датчиков Холла для контроля локальных дефектов была разработана в [16] и впоследствии усовершенствована до восьмиканальной матрицы датчиков Холла для сбора двумерной (2D) информации о рассеянии [17]. Чтобы продемонстрировать, что методика измерения сигнала 3D-МПР на поверхности троса является более предпочтительной по сравнению с измерением одномерного сигнала рассеяния, в [18] была разработана трехмерная система контроля рассеяния, основанная на намагничивании не до насыщения, с использованием туннельных магниторезистивных элементов, и они отображали трехмерный сигнал рассеяния с уменьшенным шумом в RGB-пространство для цветного изображения. Это увеличивает информацию об изображении дефекта и эффективно улучшает скорость распознавания обрыва проводов. Чтобы улучшить качество информации об изображении дефекта, в [19] карта оттенков серого, полученного 2D-МПР-сигнала, была преобразована в псевдоцветное изображение, что значительно повысило скорость распознавания обрыва провода. Однако улучшение изображения дефекта неочевидно и требует усовершенствования.

В существующей методике неразрушающего контроля тросов есть трудности, такие как невозможность контроля вдоль окружности, слабый эффект шумоподавления МПР-сигнала и низкая точность идентификации дефектов. В измеренном исходном сигнале есть несколько источников шума, поэтому в этой статье предлагается алгоритм уменьшения шума, сочетающий медианную фильтрацию, сингулярное разложение (СР) и вейвлет-преобразование. Алгоритм эффективно подавляет шум в МПР-сигнале, и ОСШ радиальной составляющей МПР-сигнала увеличивается на 13,9868 дБ, ОСШ тангенциальной составляющей увеличивается на 12,4524 дБ, а ОСШ осевой составляющей увеличивается на 28,8389 дБ по сравнению с алгоритмом, сочетающим медианный фильтр и вейвлет-преобразование. Чтобы улучшить качество информации об изображении дефекта, цветное изображение преобразуется в изображение в псевдоцветах, а определение местоположения дефекта и сегментация выполняются с использованием метода максимума модуля. Затем характеристики момента цвета из изображений в ложных цветах извлекаются и используются в качестве входных данных для МОВ и ОРЧ-МОВ для обучения и распознавания. Когда допустимая ошибка составляет 0,4505 %, а максимальная ошибка распознавания не превышает 0,9009 %, скорость распознавания ОРЧ-МОВ улучшается на 11,11 % по сравнению с МОВ. Когда допустимая ошибка составляет 0,9009 %, а максимальная ошибка распознавания не превышает 1,351 %, скорость распознавания ОРЧ-МОВ улучшается на 1,85 % по сравнению с МОВ. Результаты экспериментов показывают, что предложенный алгоритм шумоподавления эффективно подавляет шум в исходном сигнале. Изображения в псевдоцветах эффективно улучшают информацию о дефектах. Конечно, ОРЧ-МОВ также эффективно улучшает скорость распознавания дефектов.

2. РЕГИСТРАЦИЯ ДАННЫХ

В данной статье предлагается устройство сбора данных из работы [18]. Как показано на рис. 1, устройство включает в себя матрицу из датчиков магнитного поля, состоящую из 30 равномерно распределенных туннельных магниторезистивных (ТМР) датчиков, устройство кодирования и намагничивающего устройства, состоящего из 12 равномерно распределенных

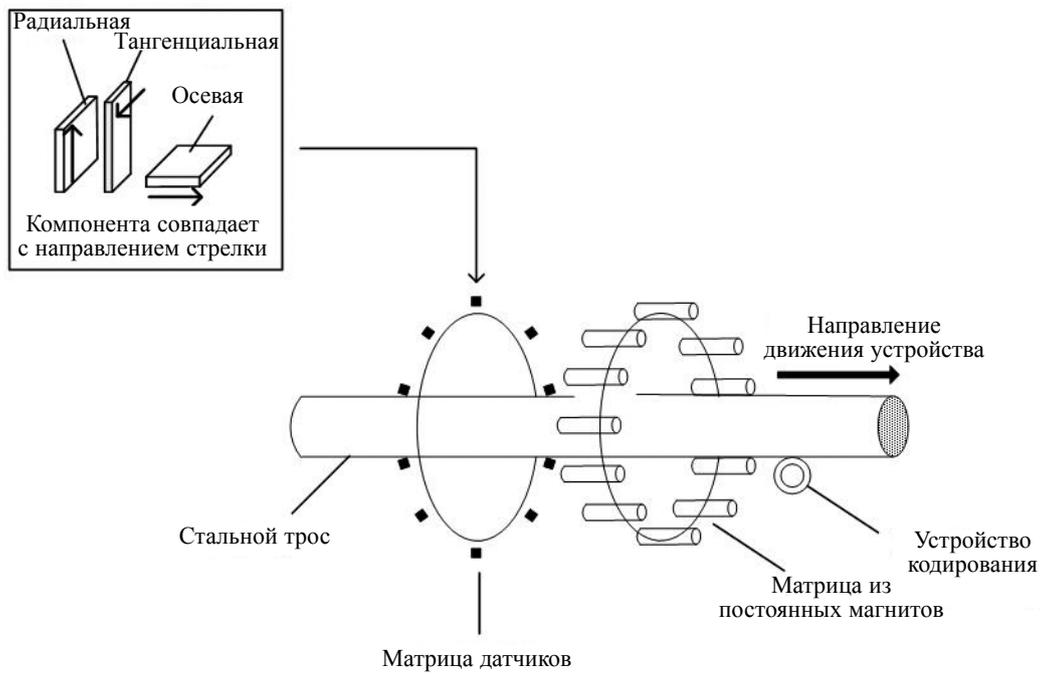


Рис. 1. Схема измерительного устройства.

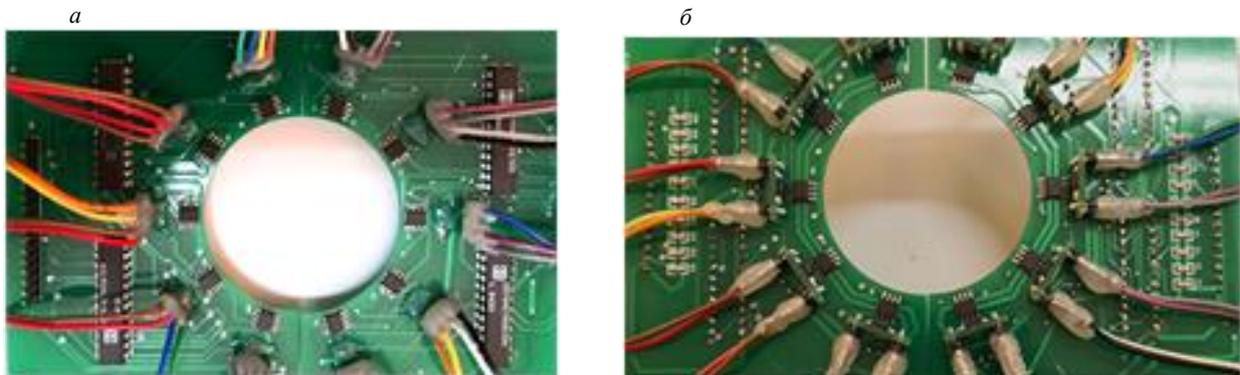


Рис. 2. Передняя (а) и задняя (б) часть матрицы датчиков магнитного поля.

постоянных магнитов из сплава неодима, железа, бора. Матрица датчиков магнитного поля показана на рис. 2. Она состоит из 10 частей, равномерно распределенных по окружности прибора. Каждый компонент содержит три ТМР-датчика, направления контроля которых перпендикулярны друг другу, для сбора радиальных, тангенциальных и осевых МПР-сигналов от троса. Процесс регистрации данных следующий: во-первых, трос намагничивается намагничивающим устройством, во-вторых, матрица датчиков регистрирует МПР-сигналы на поверхности троса. Когда прибор движется вдоль оси троса с постоянной скоростью, устройство кодирования синхронно посылает селекторные импульсы с равными интервалами. Затем, в соответствии с импульсным сигналом, под управлением контроллера трехмерный магнитный датчик поочередно улавливает трехмерный МПР-сигнал в окружном направлении троса. В этой статье рассматриваются шесть дефектов: обрыв 1-го провода, обрыв 2-х проводов, обрыв 3-х проводов, обрыв 4-х проводов, обрыв 5-и проводов и обрыв 7-и проводов. На рис. 3 показан исходный сигнал после сопоставления точек выборки. Среди них канал $(3n)$ — это сигнал осевой составляющей, $(3n - 1)$ канал — это сигнал тангенциальной составляющей, $(3n - 2)$ канал — сигнал радиальной составляющей, а n варьируется в пределах от 1 до 10.

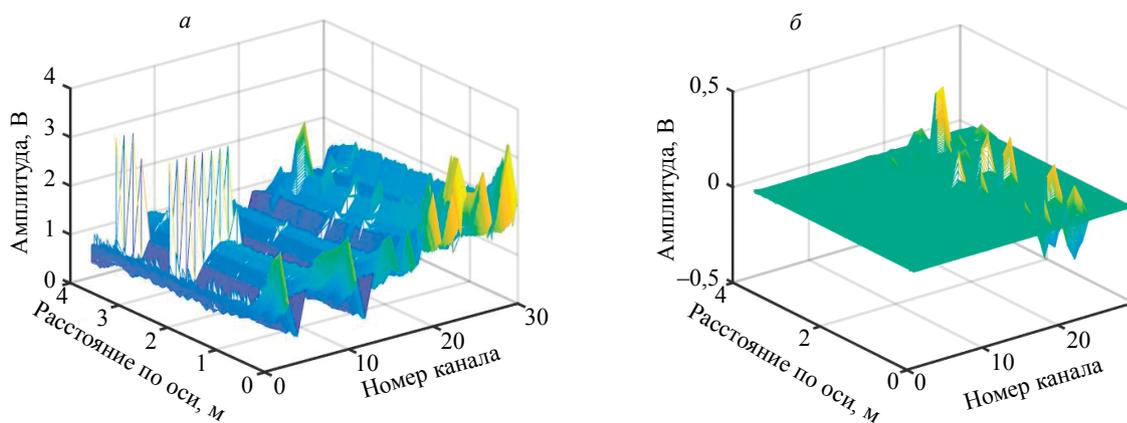


Рис. 3. Трехмерная диаграмма распределения МПР-сигнала: исходный сигнал(а); отфильтрованный сигнал (б).

2.1. Обработка данных

Исходные данные, полученные измерительным устройством, содержат много шума. Например: волновой шум, создаваемый прядями троса, флуктуация и высокочастотный МПР-шум, вызванные неравномерным намагничиванием, и шум, создаваемый дрожанием троса во время процесса измерения. Чтобы устранить влияние этих шумов на сигнал, в этой статье используется MSVDW-алгоритм для уменьшения шума исходного сигнала.

Медианная фильтрация — это метод нелинейной обработки сигналов, основанный на статистической теории упорядочения, который может эффективно подавлять шум. Он имеет хорошие характеристики сохранения краёв и способность подавлять импульсный шум, но его способность подавлять случайный шум не очень хороша [20].

2.2. Вейвлет-анализ

Вейвлет-преобразование — это метод анализа. Он унаследовал и развил идеи о локализации быстрого фурье-преобразования, но также преодолел недостаток, заключающийся в том, что размер окна не изменяется с частотой, и метод может анализировать нестационарные сигналы. В практических применениях большая часть сигналов нестационарна (нестационарные случайные процессы), поэтому это идеальный инструмент для частотно-временного анализа и обработки сигнала. Особенности вейвлет-преобразования следующие.

1. Для малых значений частоты разрешение в частотной области высокое, а разрешение во временной области низкое.

2. Для больших значений частоты разрешение в частотной области низкое, а разрешение во временной области высокое.

2.3. Сингулярное разложение

Принцип СР-шумоподавления заключается в использовании разделимости по энергии сигнала и шума для разложения матрицы, состоящей из сигнала, содержащего шум, и сохранения только сингулярных значений характеристик сигнала, чтобы достичь цели удаления шума и сохранения сигнала. Более того, это может уменьшить объем вычислений и устранить шум, поскольку небольшие сингулярные значения обычно являются шумом.

Предположим, что несущий шум сигнал: $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, тогда он может быть выражен как

$$x_i = s_i + w_i; \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где s_i — реальный сигнал; w_i — зашумленный сигнал; N — длина ряда данных. Матрица Ганкеля порядка $m \times n$ строится на основе ранее полученных данных измерения.

$$H = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & x_{m+1} & \dots & x_N \end{bmatrix} = S + W, \quad (2)$$

где $N = m + n - 1$; S — траекторная матрица, соответствующая реальному сигналу в восстановленном фазовом пространстве; W — траекторная матрица, соответствующая шуму.

Сингулярное разложение матрицы H :

$$H = U \Sigma V^H, \quad (3)$$

где $U \in R^{m \times n}$; $V \in R^{n \times n}$ — ортогональные матрицы; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$; $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, r)$ — сингулярное значение матрицы H ; $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0$; r — ранг матрицы H . Затем средняя величина собственных значений используется как пороговое значение для определения порядка восстановления k , и сигнал восстанавливается с уменьшением шума.

2.4. Описание алгоритма

Основанный на вейвлет-преобразовании процесс сингулярного разложения изложен ниже.

1) Построить матрицу Ганкеля порядка $m \times n$: $H = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & x_{m+1} & \dots & x_N \end{bmatrix}$.

2) Провести СР для шумной матрицы H , т.е. $H = U \Sigma V^H$.

3) Оценка эффективного ранга r .

4) Рассчитывается аппроксимация $\hat{X}_r = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T$ ранга r сигнала, где u_r и v_i — левый и правый сингулярные векторы высокочастотного сигнала соответственно.

5) Средняя величина собственных значений используется в качестве порогового значения для определения порядка восстановления k , и сигнал восстанавливается.

6) Вейвлет-разложение восстановленного сигнала проводится по алгоритму Малла. Устанавливаем параметры, связанные с вейвлет-разложением: используем вейвлет Добеши-V (db5), чтобы разложить сигнал ортогонально для каждого канала с числом слоёв разложения, равным $K = 8$.

7) Очистить низкочастотный сигнал и выполнить пороговую обработку высокочастотных коэффициентов.

8) Вейвлет-коэффициенты восстанавливаются, используя функцию вейвлет-разложения для получения отфильтрованного сигнала.

Исходные данные радиальной компоненты МПР до фильтрации показаны на рис.4а, а на рис. 4б показаны данные радиальной компоненты после фильтрации вышеуказанным алгоритмом. Рис. 3а показывает трехмерный МПР-сигнал после фильтрации для 30 каналов.

Авторы используют ОСШ, чтобы количественно описать эффект снижения шума, и ОСШ определяется как

$$SNR = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^N d^2(i)}{\sum_{i=1}^N (d(i) - \hat{d}(i))^2} \right), \quad (4)$$

где N — количество точек измерения; $d(i)$ — МПР-сигнал после шумоподавления; $\hat{d}(i)$ — эффективная часть МПР-сигнала после шумоподавления, чем больше ОСШ, тем лучше эффект уменьшения шума.

6 репрезентативных сигналов выбираются из набора МПР-сигналов и ОСШ алгоритма, комбинирующего медианную фильтрацию и вейвлет-преобразование, сравнивается с ОСШ алгоритма,

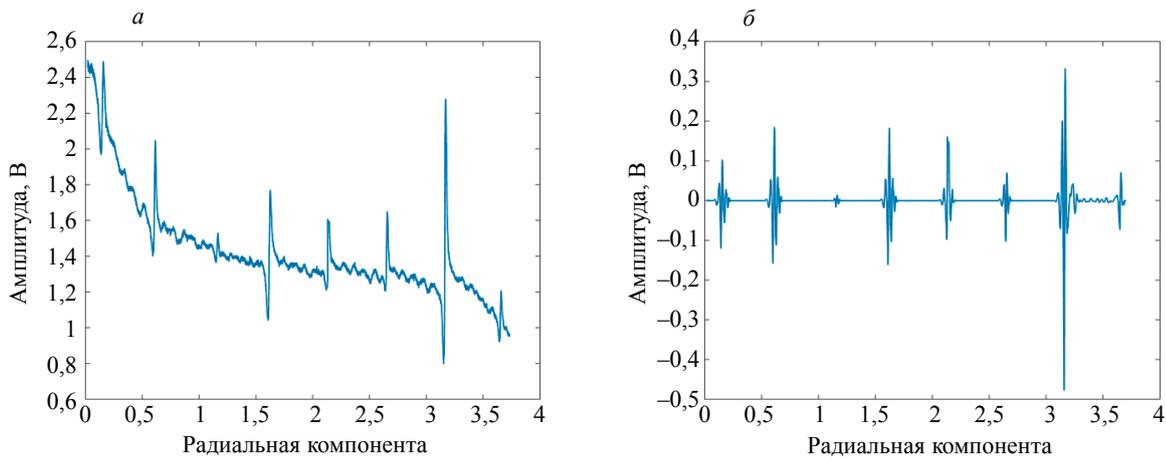


Рис. 4. Радиальная компонента МПР-сигнала: исходный сигнал (а); отфильтрованный сигнал (б).

предложенном в этой статье. Табл. 1 показывает результаты расчета ОСШ для обоих алгоритмов. Как видно из табл. 1, ОСН радиальной компоненты МПР-сигнала улучшается до 15,5357 дБ; ОСН тангенциальной компоненты МПР-сигнала улучшается до 12,9278 дБ; ОСН осевой компоненты МПР-сигнала улучшается до значения 33,6053 дБ.

Таблица 1

Сравнение ОСШ алгоритма, комбинирующего медианную фильтрацию и вейвлет-преобразование, и ОСШ алгоритма, предложенного в этой статье

	Пороговое шумоподавление посредством медианной фильтрации, скомбинированной с вейвлет-преобразованием			Предлагаемый алгоритм		
	Радиальная компонента, дБ	Тангенциальная компонента, дБ	Осевая компонента, дБ	Радиальная компонента, дБ	Тангенциальная компонента, дБ	Осевая компонента, дБ
1	27,2185	22,7632	18,9024	59,6139	39,0637	56,9338
2	30,2777	31,1119	21,2238	49,6660	53,9299	61,7310
3	34,8958	33,0042	32,5571	36,1945	36,2176	59,0912
4	31,2058	32,3874	24,5519	36,2155	42,9426	61,8133
5	31,2311	32,9534	23,2599	44,5029	46,6349	49,8587
6	31,7198	29,8472	28,4744	53,5702	41,4112	61,1736
Среднее	31,0915	30,4389	24,8283	46,6272	43,3667	58,4336

3. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

В результате обработки изображений сложные исходные данные могут представлять в виде интуитивно понятных, кратких и простых для понимания изображений. В этом разделе авторы подготавливаются к последующей количественной идентификации канатов с помощью нормализации серой шкалы, трехкратной сплайн-интерполяции, преобразования изображения в псевдоцветах, а также локализации и сегментации дефектов.

3.1. Нормализация и интерполяция

Нормализация в оттенках серого — это процесс преобразования МПР-данных в визуальные данные, который является основой для создания цветных изображений трехмерных МПР-сигналов. МПР-данные нормализуются с использованием метода min-max нормализации, как показано в уравнении:

$$data(i, j) = 255 - \frac{data(i, j) - data_{\min}}{data_{\max} - data_{\min}} \times 255, \quad (5)$$

где $data_{\min}$ — минимальное значение в группе схожих данных; $data_{\max}$ — максимальное значение в группе схожих данных.

Система сбора данных в этой статье использует 10-канальную матрицу датчиков, поэтому окружное разрешение МПР-изображения составляет всего 10, что намного ниже, чем осевое разрешение. Чтобы сделать МПР-изображение более интуитивно понятным и избежать низкого разрешения отображения дефектов, необходима круговая интерполяция. Мы используем интерполяцию кубическим сплайном, чтобы улучшить разрешение по окружности с 10 до 192.

3.2. Преобразование псевдоцветов

Усиление псевдоцветов — это преобразование естественного цветного изображения или мультиспектрального изображения одного и того же участка в новый трехцветный компонент с помощью функции сопоставления, а синтез цветов заставляет интересующую цель проявляться в другом цвете, по сравнению с исходным изображением. Для увеличения способности распознавания изображений в этой статье используются следующие линейные соотношения сопоставления псевдоцветов:

$$\begin{bmatrix} R_f \\ G_f \\ B_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_f \\ G_f \\ B_f \end{bmatrix}. \quad (6)$$

В этой статье аксиальные компоненты x , y и z нормализованного МПР-сигнала отображаются в каналы красного, зеленого и синего цветов для получения цветного МПР-изображения, как показано на рис. 5а. Весовой коэффициент зеленого канала устанавливается на 0,8, а красного и синего каналов — на 1. Затем цветное изображение преобразуется в изображение в псевдоцвете, как показано на рис. 5б, в соответствии с указанным выше соотношением.

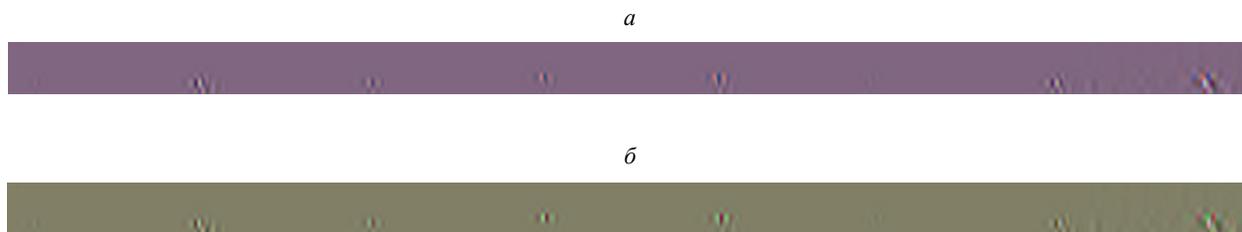


Рис. 5. Усиление псевдоцветов: цветное изображение (а); изображение в псевдоцветах (б).

3.3. Локализация и сегментация дефектов

В данной статье используется метод максимума модуля для локализации и сегментации дефектов, и он состоит из следующих шагов.

1. Выбрать первый цветовой канал цветного МПР-изображения и провести суммирование по окружности на МПР-данных для получения последовательности $d(j)$, где $j = 1, 2, 3, \dots, N$, N — количество точек измерения по оси.

2. Установить пороговое значение для последовательности $d(j)$, сохранить наибольшее значение в этой последовательности и принять точку ниже порогового значения за 0. И записать порядковый номер локального максимума в последовательности.

3. В соответствии с шириной дефекта осевая длина изображения дефекта составляет около 192 пикселей, поэтому изображение дефекта в ложном цвете $192 \times 192 \times 3$ сегментируется в соответствии с порядковым номером максимума.

Изображения в псевдоцветах дефектов шести поврежденных тросов, которые сегментировались согласно вышеописанному алгоритму, показаны на рис. 6.

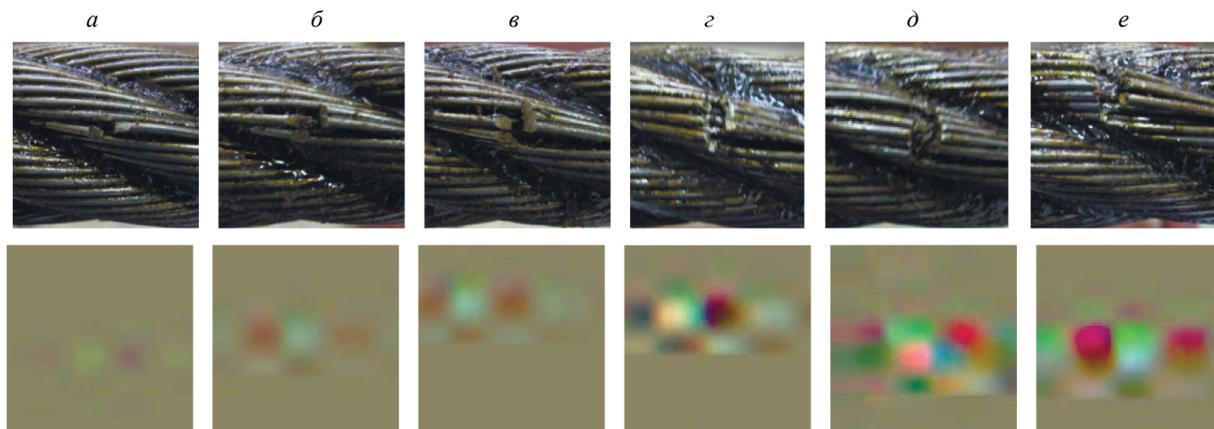


Рис. 6. Фотографии (верхняя строка) и изображения в псевдоцветах (нижняя строка) дефектов шести различных поврежденных тросов: 1 поврежденная проволока (а); 2 поврежденные проволоки (б); 3 поврежденные проволоки (в); 4 поврежденные проволоки (г); 5 поврежденных проволок (д); 7 поврежденных проволок (е).

4. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Количественная идентификация дефектов обрыва каната является важной целью неразрушающего контроля тросов. Чтобы провести контроль троса как можно точнее, искусственно создаются дефекты обрыва проволоки (1, 2, 3, 4, 5, 7 оборванных проволок) и небольшие зазоры (около 2 мм) для стального троса $6 \times 37S + FC$ с номинальным диаметром 30 мм. В этом разделе цветовые параметры извлекаются из изображений в псевдоцветах, а затем сравниваются результаты обучения МОВ и ОРЧ-МОВ.

4.1. Выделение данных

Момент цвета — очень простой и эффективный параметр, предложенный Stricker и Orengo [21]. Его математическая основа состоит в том, что любой цвет в изображении может быть представлен его моментом. Преимущество использования цветовых моментов для представления информации об изображении состоит в том, что нет необходимости квантовать цветовое пространство, а вектор признаков имеет низкую размерность. Более того, поскольку информация о цвете в основном сосредоточена в моментах низшего порядка, для представления цветового распределения используются момент первого порядка (среднее значение), момент второго порядка (дисперсия) и момент третьего порядка (асимметрия). Следовательно, для цветового момента изображения требуется 9 компонент (3 цветовых канала, каждый с 3 моментами низшего порядка). Математические выражения трех цветовых моментов следующие:

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{i,j}; \quad (7)$$

$$\sigma_i = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (p_{i,j} - \mu_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (8)$$

$$s_i = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (p_{i,j} - \mu_{i,j})^3 \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

где N — количество пикселей; $p_{i,j}$ — i -я цветовая компонента j -го пикселя.

Следовательно, 3 цветовых момента каналов RGB в области дефекта на изображении образуют 9-мерный вектор признаков, который выражается как

$$F_{color} = [\mu_R, \sigma_R, S_R, \mu_G, \sigma_G, S_G, \mu_B, \sigma_B, S_B]. \quad (10)$$

4.2. Метод опорных векторов

МОВ — это метод машинного обучения, основанный на принципе минимизации структурных рисков, а классификатор МОВ может решать задачи классификации с небольшими обучающими выборками, высокой размерностью и нелинейностью. Мы используем извлеченные характеристики момента цвета в качестве образцов характеристик ОРЧ-МОВ и нормализуем значения характеристик момента цвета каждого стандартного образца изображения до $[-1, 1]$ в качестве набора входных образцов. Затем 254 объекта выборки случайным образом делятся на две группы. Среди них 200 групп выборочных данных используются в качестве обучающих наборов, а остальные 54 группы используются в качестве тестовых наборов. МОВ имеет два важных параметра: один — это коэффициент регуляризации (c), а другой — параметр ядра (g , функция ядра Гаусса). Для оптимизации этих двух параметров на базе libsvm-инструментария в данной статье используется алгоритм оптимизации роя частиц. Поскольку эта статья представляет собой задачу множественной классификации, используется целевая функция максимизации точности. Параметрами оптимизации являются только c и g , поэтому количество параметров оптимизации установлено равным 2. Затем устанавливаются параметры 5-кратной перекрестной проверки. Параметры ОРЧ задаются, количество роев частиц устанавливается равным 6, а максимальное количество итераций установлено на 40. Наконец, модель МОВ переобучается с использованием оптимальных значений параметров. После нескольких рандомизированных испытаний фактическая классификация и прогнозируемая классификация тестовой выборки показаны на рис. 7а, а ошибка распознавания в тестовом наборе показана на рис. 7б. Скорость распознавания МОВ

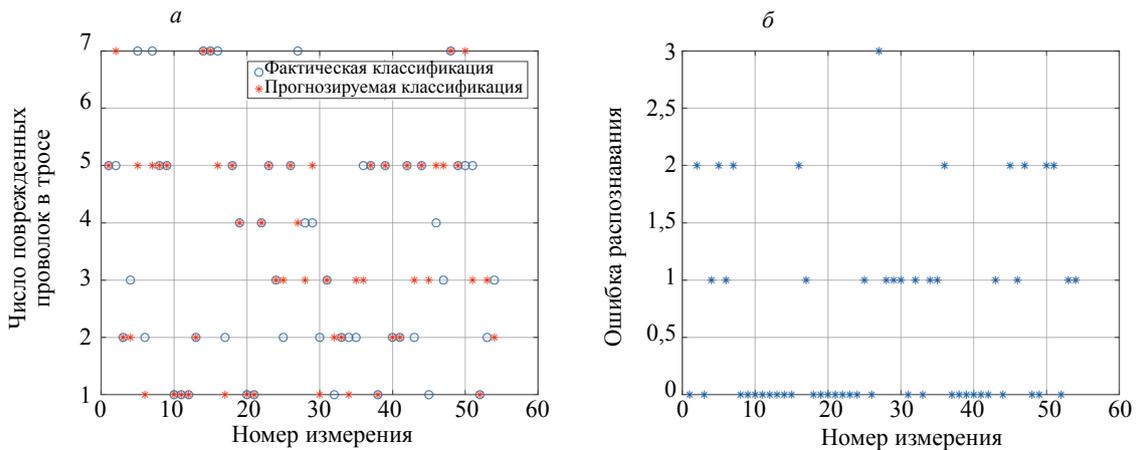


Рис. 7. Результаты обучения на тестовом наборе данных: фактическая и прогнозируемая классификация (а); ошибка распознавания (б).

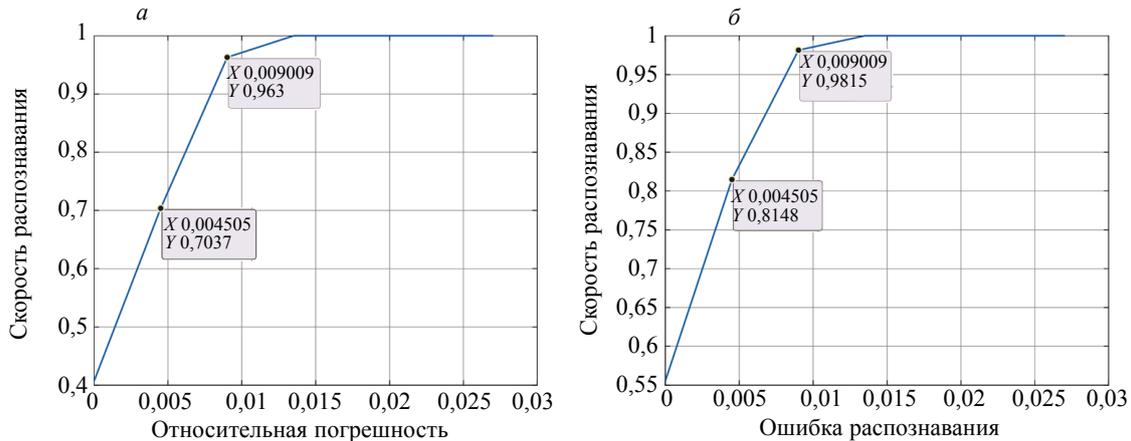


Рис. 8. Скорость распознавания на тестовом наборе: скорость распознавания МОВ (а); скорость распознавания ОРЧ—МОВ (б).

показана на рис. 8а, а скорость распознавания ОРЧ-МОВ показана на рис. 8б.

Как видно из рис. 7, ошибка в распознавании обрыва провода имеет место для 1 провода и 2 провода, а распознавание дефектов других проводов происходит лучше. Как видно из рис. 8, точность распознавания МОВ составляет 70,37 %, когда допустимая ошибка составляет 0,4505 %, а максимальная ошибка распознавания не превышает 0,9009 %. При тех же условиях точность распознавания ОРЧ-МОВ составляет 81,48 %. В этих условиях точность распознавания ОРЧ-МОВ улучшается на 11,11 % по сравнению с МОВ. Когда допустимая ошибка составляет 0,9009 %, а максимальная ошибка распознавания не превышает 1,351 %, точность распознавания МОВ составляет 96,3 %. При тех же условиях точность распознавания ОРЧ-МОВ составляет 98,15 %. В этих условиях точность распознавания ОРЧ-МОВ улучшается на 1,85 % по сравнению с МОВ. Результаты экспериментов показывают, что ОРЧ-МОВ обеспечивает лучшие результаты при распознавании обрыва каната.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье реализованы локализация и количественная идентификация дефектов каната, а также предложен алгоритм шумоподавления, сочетающий медианную фильтрацию, разложение по сингулярным значениям и вейвлет-преобразование. Более того, алгоритм может эффективно снижать шум в исходном сигнале и значительно улучшить ОСШ сигнала. Во-вторых, были нормализованы МПР-данные после шумоподавления для получения изображения сигнала в оттенках серого, а окружное разрешение изображения в оттенках серого было улучшено с помощью интерполяции кубическим сплайном. В-третьих, псевдоцвет используется для повышения информативности изображения дефекта. Затем метод максимума модуля используется для сегментации изображения в псевдоцветах. Наконец, извлекаются моменты цвета дефекта. Девять извлеченных векторов признаков дефектов используются в качестве входных данных ОРЧ-МОВ для количественной идентификации обрыва провода, и, в итоге, получаются хорошие результаты по распознаванию дефектов. В будущих исследованиях мы сосредоточимся на улучшении оборудования, оптимизации алгоритма шумоподавления и улучшении качества изображения.

Работа частично поддержана Национальным Фондом Естественных Наук Китая (№ Гранта U2004163).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Min Z.* Research on Key Technologies of Quantitative Detection of Magnetic Leakage in Local Defects // 2012. doi: 10.7666/d.D243446
2. *Tse P.W., Rostami J.* Advanced signal processing methods applied to guided waves for wire rope defect detection. 2016.
3. *Zhang D., Zhou Z., Sun J., Zhang E., Yang Y., Zhao M.* A Magnetostrictive Guided-Wave Nondestructive Testing Method With Multifrequency Excitation Pulse Signal // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. V. 63. No. 12. P. 3058—3066. doi: 10.1109/tim.2014.2324812
4. *Yan X., Zhang D., Zhao F.* Improve the signal to noise ratio and installation convenience of the inductive coil for wire rope nondestructive testing // NDT & E International. 2017. V. 92. P. 221—227. doi: 10.1016/j.ndteint.2017.09.005
5. *Bernieri A., Betta G., Ferrigno L., Laracca M., Mastrostefano S.* Multifrequency Excitation and Support Vector Machine Regressor for ECT Defect Characterization // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. V. 63. No. 5. P. 1272—1280. doi: 10.1109/tim.2013.2292326
6. *Chen H., Wang C., Zuo X.* Research on methods of defect classification based on metal magnetic memory // NDT & E International. 2017. V. 92. P. 82—87. doi: 10.1016/j.ndteint.2017.08.002
7. *Li J.Y.* et al. Literature Review of Research on the Technology of Wire Rope Nondestructive Inspection in China and Abroad // MATEC Web of Conferences. 2015. V. 22. doi: 10.1051/mateconf/20152203025
8. *Sharatchandra Singh W., Rao B.P.C., Mukhopadhyay C.K., Jayakumar T.* GMR-based magnetic flux leakage technique for condition monitoring of steel track rope // Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2011. V. 53. No. 7. P. 377—381. doi: 10.1784/insi.2011.53.7.377
9. *Jomdecha C., Prateepasen A.* Design of modified electromagnetic main-flux for steel wire rope inspection // NDT & E International. 2009. V. 42. No. 1. P. 77—83. doi: 10.1016/j.ndteint.2007.10.006
10. *Fedorko G., Molnár V., Ferková Ž., Peterka P., Krešák J., Tomašková M.* Possibilities of failure analysis for steel cord conveyor belts using knowledge obtained from non-destructive testing of steel ropes // Engineering Failure Analysis. 2016. V. 67. P. 33—45. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.026
11. *Park S.H., Kim J.W., Nam M.J., Lee J.J.* Magnetic Flux Leakage Sensing-Based Steel Cable NDE Technique Incorporated on a Cable Climbing Robot for Bridge Structures // Advances in Science and

Technology. 2012. V. 83. P. 217—222. doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.83.217

12. Sun Y., Liu S., Li R., Ye Z., Kang Y., Chen S. A new magnetic flux leakage sensor based on open magnetizing method and its on-line automated structural health monitoring methodology // Structural Health Monitoring. 2015. V. 14. No. 6. P. 583—603. doi: 10.1177/1475921715604387

13. Zhang J., Tan X., Zheng P. Non-Destructive Detection of Wire Rope Discontinuities from Residual Magnetic Field Images Using the Hilbert-Huang Transform and Compressed Sensing // Sensors (Basel). Mar. 16. 2017. V. 17. No. 3. doi: 10.3390/s17030608

14. Sun Y., Liu S., Ye Z., Chen S., Zhou Q. A Defect Evaluation Methodology Based on Multiple Magnetic Flux Leakage (MFL) Testing Signal Eigenvalues // Research in Nondestructive Evaluation. 2015. V. 27. No. 1. P. 1—25. doi: 10.1080/09349847.2015.1039100

15. Yinni C. Research on quantitative detection of local defects of steel wire rope based on magnetic flux leakage imaging principle // 2008. doi: CNKI:CDMD:1.2008.194712.

16. Kim J.-W., Park S. Magnetic flux leakage-based local damage detection and quantification for steel wire rope non-destructive evaluation // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2017. V. 29. No. 17. P. 3396—3410. doi: 10.1177/1045389x17721038

17. Kim J.W., Park S. Magnetic Flux Leakage Sensing and Artificial Neural Network Pattern Recognition-Based Automated Damage Detection and Quantification for Wire Rope Non-Destructive Evaluation // Sensors (Basel). Jan 2 2018. V. 18. No. 1. doi: 10.3390/s18010109

18. Zhang J., Peng F., Chen J. Quantitative Detection of Wire Rope Based on Three-Dimensional Magnetic Flux Leakage Color Imaging Technology // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 104165—104174. doi: 10.1109/access.2020.2999584

19. Zheng P., Zhang J. Quantitative nondestructive testing of wire rope based on pseudo-color image enhancement technology // Nondestructive Testing and Evaluation. 2019. V. 34. No. 3. P. 221—242. doi: 10.1080/10589759.2019.1590827

20. Panetta K., Bao L., Agaian S. A New Unified Impulse Noise Removal Algorithm Using a New Reference Sequence-to-Sequence Similarity Detector // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 37225—37236. doi: 10.1109/access.2018.2850518

21. Orenzo M.S. a. M. Similarity of color images // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 1995. doi: 10.1117/12.205308

ПРЕСС-РЕЛИЗ**В ногу со временем: Итоги выставки «Металлообработка-2021»**

24—28 мая в Москве прошла 21-я международная специализированная выставка «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности» — «Металлообработка-2021».



Выставка, организованная ЦВК «Экспоцентр» при поддержке Совета Федерации Федерального Собрания РФ, Министерства промышленности и торговли РФ, Союза машиностроителей России, прошла под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ и представила достижения 790 компаний из 30 стран мира.

В церемонии официального открытия приняли участие представители Государственной Думы ФС РФ, Союза машиностроителей России, Министерства промышленности и торговли РФ, Коллегии Военно-промышленной комиссии РФ, Оргкомитета проекта «НТИ—Экспо» («Наука—Технологии—Инновации—Экспо»), Фонда развития промышленности и Российской Ассоциации производителей станкоинструментальной продукции «Станкоинструмент». На открытии присут-





ствовал Кристофф Блеттлер — генеральный секретарь Ассоциации сектора производителей станкоинструментального оборудования Швейцарии (SWISSMEM). Выставку посетил чрезвычайный и полномочный посол Швейцарии в Российской Федерации.

За 4 дня работы выставки экспозицию посетили более 32 000 специалистов из 55 стран. Значительная часть общей площади в 32 000 м² была отведена павильону российских производителей, а также национальным экспозициям Германии, Чехии, Швейцарии, Республики Беларусь и коллективной Италии.

Региональные коллективные экспозиции представили компании Воронежской, Калужской, Липецкой, Московской, Пензенской, Самарской, Тверской областей, Краснодарского и Красноярского края.

Тематические разделы охватили весь потенциал станкостроительной и металлообрабатывающей отраслей — от передовых станочных систем, автоматических линий, оборудования для обработки металлов и технологической оснастки до передовых разработок в области аддитивного производства, цифровизации, роботизации и т.д.

Завершил работу выставки «Металлообработка-2021» командный турнир Кибербиатлон «IT-battle», организованный для начинающих специалистов и студентов, чтобы выявить профессиональные компетенции в области информационной безопасности, а также дизайна и программирования в промышленной информатике.

В настоящий момент ЦВК «Экспоцентр» приступил к подготовке следующей, 22-й международной выставки «Металлообработка-2022», которая будет проходить с 23 по 27 мая 2022 г.

«Несмотря на ограничительные меры, принятые в ответ на сложившуюся эпидемиологическую ситуацию в мире, «Металлообработка-2021» прошла не менее масштабно, чем раньше! Нам удалось сформировать и организовать действительно актуальное отраслевое событие с насыщенной деловой программой, где участники оценили тренды и потребности рынка, представили свои разработки, а также получили возможность обсудить актуальные вопросы с существующими и потенциальными клиентами. Успех новых разделов, организованных в этом году, показывает, что у выставки еще есть большой потенциал для роста и мотивирует продолжать работу в этом направлении. «Металлообработка» всегда была эффективной площадкой для профессионального диалога, и этот год не стал исключением», — прокомментировала Елена Гусева, начальник Управления собственных выставок АО «Экспоцентр».

Правила отправки статей в журнал «Дефектоскопия»

Уважаемые авторы, напоминаем Вам, что согласно требованиям издательства ООО «ИКЦ АКАДЕМКНИГА» и РАН, с 2020 года статьи в журнал «Дефектоскопия» принимаются и отправляются на рецензирование только через портал электронной редакционно-издательской системы (РИС). Для отправки статьи Вам необходимо зарегистрироваться как автору и загрузить Вашу статью в журнал через портал РИС по адресу: <https://publish.sciencejournals.ru/login?lang=ru>.

Подробные инструкции по работе на портале будут доступны в Вашем личном кабинете.

Для корректной работы рекомендуется использовать следующие браузеры:

Google Chrome версии 60 и выше, Safari версия 11 и выше.

Редколлегия