Российская академия наук

# *ДЕФЕКТОСКОПИЯ*

Журнал ежемесячный Основан в феврале 1965 года Екатеринбург

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Акустические методы

<b>Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, В.В. Чернова.</b> Локация сигналов акустической эмиссии от ударных воздействий на образец из углепластика при использовании антенн из пьезо- и волоконно-оптических датчиков	3
<b>О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, М.А. Синцов, Л.В. Волкова.</b> Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым методами контроля.	14
Ву Липэн, Ли Чжэнчжэн, Лиу Чанг Хонг. Контроль коррозионных повреждений гибкого бетона, содержащего керамические отходы, методом акустической эмиссии	26
Кай Луо, Лян Чэнь, Вэй Лянь, Хаобо Вен. Эксперимент по волновой томографии Лэмба алюминиевых пластин, основанной на веерном сканировании	36
<b>М.А. Абреу Филью, К. Морено, Е. Лусо.</b> Применение скорости ультразвукового эхоимпульса в качестве метода неразрушающего контроля для прогнозирования прочности и однородности бетона	44
Тепловые методы	

### Электромагнитные методы

УДК 620.179.17:539.422.5

### ЛОКАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОТ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБРАЗЕЦ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНТЕНН ИЗ ПЬЕЗО- И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

© 2022 г. Л.Н. Степанова<sup>1,\*,\*\*</sup>, С.И. Кабанов<sup>1,\*\*</sup>, В.В. Чернова<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина», Россия 630051 Новосибирск, ул. Ползунова, 21 <sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Россия 630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191 E-mail:\*aergroup@ngs.ru; \*\*stepanova@ stu.ru

## Поступила в редакцию 18.02.2022; после доработки 09.03.2022 Принята к публикации 11.03.2022

Проведены сравнительные испытания, связанные с локацией сигналов акустической эмиссии (АЭ) от ударных воздействий на образец из углепластика 7700. На образец были установлены пьезоэлектрические преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) и волоконно-оптические датчики (ВОД), образующие прямоугольные локационные антенны размерами 360×280 мм. Удары осуществлялись шариками массой 10 и 18,5 г. Были организованы антенны, состоящие из четырех датчиков ПАЭ и четырех датчиков ВОД, и антенны, состоящей из двух датчиков ПАЭ и двух датчиков ВОД. При использовании антенны, в которой находились четыре датчика ВОД, ударное воздействие на образец производилось грузом массой 530 г, сбрасываемым с высоты 400 мм.

Сигналы АЭ регистрировались системой СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции во время сброса шарика и при его повторных отскоках. Затем формировались кластеры из сигналов АЭ, зарегистрированных при ударных воздействиях грузов. Времена прихода сигналов АЭ на датчики антенн были рассчитаны пороговым методом, методом среднего квадратического отклонения (СКО) и двухинтервальным методом. Показано, что максимальная погрешность локации сигналов АЭ получена при сбросе стального шарика диаметром 16 мм с высоты 300 мм, а минимальная — при использовании электронного имитатора.

*Ключевые слова*: углепластик, статика, удар, дефект, акустическая эмиссия, локация, погрешность, пьезоэлектрический и волоконно-оптический датчики.

DOI: 10.31857/S0130308222040017, EDN: BLAONB

#### введение

В процессе нагружения авиационных конструкций из композиционных материалов (КМ) исследуются влияния ударных повреждений, перегрузок, вызывающих их расслоение, ухудшение прочностных и жесткостных характеристик. Возникающие при этом дефекты могут приводить к внезапному разрушению материала углепластика. Опасность представляют собой даже относительно небольшие по мощности удары, не оставляющие видимых следов на поверхности композиционной конструкции, но приводящие к возникновению внутренних дефектов [1—3].

Мониторинг и оценка развития дефектов от ударов в элементах авиационных конструкций из углепластика требуют регистрации как процесса соударения, так и последующего контроля материала в области удара [4—5].

Для контроля конструкций из КМ применяются ультразвуковой (УЗ), рентгеновский, тепловизионный, оптический, акустико-эмиссионный (АЭ) и другие методы неразрушающего контроля (НК). Метод АЭ обладает высокой чувствительностью, позволяет определять степень опасности дефектов, в режиме реального времени локализует зону разрушения, может оценивать остаточный ресурс конструкции.

При контроле конструкций из углепластика необходимо учитывать влияние анизотропии на скорость распространения упругих волн от дефектов, что отражается на точности их локации. Наличие шумов от нагружающих устройств, сложности в получении оперативной информации об основных информативных параметрах сигналов АЭ, функционально связанных с процессами развития дефектов и разрушением конструкции — все это требует дальнейшего анализа и разработки методов контроля, позволяющих повышать точностные характеристики.

В результатах АЭ исследований, полученных *NASA*, отмечается, что при регистрации ударов в аэрокосмических конструкциях микроструктура композита оказывает влияние не только на его прочность и механические свойства, но и на структуру самих сигналов АЭ [6]. При решении задач локации дефектов это может приводить к снижению точностных характеристик, осложнять расшифровку и обработку АЭ-информации. При разработке методик контроля, позволяющих определять координаты, тип дефектов и степень их опасности в композиционных конструкциях, используются такие информативные параметры, как *MARSE*, структурный коэффициент, плоскостная локация, энергия удара, амплитудное распределение [7—11].

Известно, что АЭ-системы, в основном, работают с пьезоэлектрическими преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ). Однако в настоящее время как в нашей стране [8, 12—14], так и за рубежом [15—20] проводятся работы, в которых в антенны при АЭ-контроле включаются воло-конно-оптические датчики (ВОД). Среди основных преимуществ датчиков ВОД (по сравнению с датчиками ПАЭ) следует отметить малые габариты и массу, нечувствительность к электромагнитным шумам и помехам, слабая чувствительность к вибрации, линейность амплитудно-частотной характеристики, возможность при многоточечных измерениях использовать одно оптическое во-локно, организация на волокне различных типов датчиков, предназначенных не только для работы с акустическими сигналами, но и для измерения температуры и деформации [12].

Цель работы — анализ результатов локации сигналов АЭ, зарегистрированных в образце из углепластика от ударных нагрузок с использованием АЭ-системы, работающей с различными антеннами, состоящими из сочетания пьезо- и волоконно-оптических датчиков.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения испытаний использовался образец из углепластика *T*700 размером 800×450×1,2 мм, на который были установлены четыре пьезоэлектрических датчика ПК 01-07 и четыре датчика ВОД Фабри—Перо, образующих прямоугольные локационные антенны размерами 360×280 мм (рис. 1). При регистрации АЭ-информации в процессе ударного нагружения образца были организованы четыре вида антенн. Первая антенна состояла из четырех пьезоэлектрических датчиков ПАЭ. Вторая и третья антенны состояли из двух пьезоэлектрических датчиков ВОД. В четвертой антенне были включены четыре датчика ВОД. В результате испытаний определялись погрешности локации сигналов АЭ в процессе сбросов и отскоках груза.



Рис. 1. Внешний вид локационной антенны с пьезоэлектрическими и волоконно-оптическими датчиками и отмеченными местами ударных воздействий на образце из углепластика.

Перед испытаниями в рабочей зоне образца были размечены 16 точек, расстояние между которыми составляло 80 мм (см. рис. 1). Сначала использовалась первая антенна, состоящая из четырех пьезоэлектрических датчиков ПАЭ, работающих в частотном диапазоне (100—700) кГц. Регистрация АЭ-информации осуществлялась АЭ-системой СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции (свидетельство Федерального агентства по техническому регули-

рованию и метрологии RU.C.27/ 007 А №40707, регистрационный номер в Государственном реестре средств измерений 45154—10).

Погрешности измерения координат дефектов в композиционных конструкциях, определяемые методом АЭ, зависят от погрешностей измерения времени прихода сигнала на датчики антенны и погрешности определения скорости звука в рабочей зоне [4, 5]. Для измерения скорости звука в углепластике *T*700 была проведена автоматическая калибровка рабочей локационной зоны образца, при которой каждый датчик ПАЭ поочередно переводился в режим излучения, а оставшиеся три датчика антенны работали в режиме приема.

По результатам калибровки скорость звука быстрой моды S0, распространяющейся в направлении оси X между датчиками ПАЭ 4 и ПАЭ 5 (см. рис. 1), составила  $V_x = 360 \text{ мм}/72 \text{ мкc} = 5,0 \text{ мм}/мкс.$  Скорость распространения быстрой моды S0, проходящей вдоль оси Y от датчика ПАЭ4 к датчику ПАЭ3, была равна  $V_y = 280 \text{ мм}/48 \text{ мкc} = 5,83 \text{ мм}/мкс, и в направлении XY от датчика ПАЭ 4 к датчику ПАЭ 2 она составила <math>V_{xy} = 456 \text{ мм}/84 \text{ мкc} = 5,43 \text{ мм}/мкс.$  Таким образом, для данного образца по скорости звука наблюдалась значительная анизотропия. По результатам автоматической калибровки были определены координаты датчиков ПАЭ в локационной зоне в единицах времени (мкс) для быстрой моды S0: ПАЭ4 (0 0); ПАЭ 5 (72,7; 0); ПАЭ2 (72,7; 48,5); ПАЭ3 (0; 48,5).

Перед началом ударных испытаний в каждую из 16 отмеченных точек на образце (см. рис. 1) вводились сигналы от имитатора. Использовалось два типа имитаторов. При ра-боте с имитатором Су—Нильсена в каждой точке выполнялись изломы грифеля карандаша твердостью 2H, диаметром 0,5 мм, под углом 45°. При работе с электронным имитатором в каждую точку вводились электрические сигналы напряжением 80 В и длительностью 150 мкс. Сигнал с электронного имитатора поступал на пьезоэлектрический датчик ПАЭ и переводил его в режим излучения. После работы с имитаторами осуществлялся расчет погрешностей определения координат в каждой отмеченной точке образца.

Затем выполнялись удары, связанные со сбросом с высоты  $h_1 = 300$  мм и  $h_2 = 600$  мм стальных шариков в каждую отмеченную точку образца. Для испытаний использовались шарики диаметром  $d_1 = 10$  мм и массой 4,5 г, диаметром  $d_2 = 16$  мм и массой 18,5 г. Точный сброс шариков в каждую точку образца осуществлялся через трубу длиной 600 мм. Шарик диаметром  $d_2 = 16$  мм сбрасывался с высоты  $h_1 = 300$  мм, а шарик диаметром  $d_2 = 10$  мм — с высоты  $h_2 = 600$  мм.

Энергия удара определялась как [10]

$$E = mgh, \tag{1}$$

где *m* — масса груза, кг; *g* — ускорение свободного падения, м/с; *h* — высота падения груза, м.

Таким образом, энергия при сбросе шарика массой  $m_1 = 4,5$  г с высоты  $h_2 = 600$  мм определялась по формуле (1) и составила  $E_{12} = 0,026$  Дж. Энергия удара при сбросе шарика массой  $m_2 = 18,5$  г с высоты  $h_1 = 300$  мм составила  $E_{21} = 0,055$  Дж.

Сигналы АЭ регистрировались системой как после сброса шарика, так и во время его повторных отскоков. Затем формировались кластеры из сигналов АЭ, зарегистрированных при ударных воздействиях в каждую точку образца [21]. Было сформировано 16 кластеров и для каждого из них определялись координаты центра как среднее значение координат всех сигналов в кластере. Для определения координат отмеченных точек на образце выполнялась локация сигналов АЭ. Случайная составляющая погрешности координат рассчитывалась по средним квадратическим отклонениям (*S<sub>vi</sub>*, *S<sub>vi</sub>*) в каждом кластере [22].

При расчете систематическая составляющая погрешности координаты X, Y центра кластера определялась в единицах разности времен прихода (РВП) в микросекундах и умножалась на скорость быстрой моды S0 по осям X (5,0 мм/мкс) и Y (5,83 мм/мкс). Координаты центра локации определялись в миллиметрах как [22]

$$X_i = X_{\text{PBII}} \times V_x; \quad Y_i = Y_{\text{PBII}} \times V_y,$$

где *i* — номер точки ударного воздействия (кластера);  $x_{\text{PBII}}$ ,  $y_{\text{PBII}}$  —координаты датчиков во временной области, мкс;  $X_i$ ,  $Y_i$  — измеренные координаты источника по осям X, Y, мм;  $V_x$ ,  $V_y$  — скорости распространения быстрой моды S0 по осям X, Y, мм/мкс.

Для определения погрешностей времен прихода сигналов АЭ на датчики ПАЭ проведены расчеты при использовании порогового метода, метода среднего квадратического отклонения (СКО) и двухинтервального метода [7, 10].

Дефектоскопия № 4 2022

Время прихода по пороговому методу рассчитывалось по моменту превышения сигналом АЭ некоторого уровня, который определялся шумом в его предыстории. При этом вводилось автоматическое определение порогового уровня, в котором порог задавался как [7]

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{шум}} + U_{\text{доб.ш}},$$

где  $U_{\rm шум}$  — уровень шума, рассчитанный в области предыстории сигнала;  $U_{\rm доб.m}$  — добавка к уровню шума.

При использовании метода СКО применялось временное «окно» длительностью в несколько микросекунд, которое накладывалось на оцифровку сигнала АЭ. В «окне» рассчитывался некоторый параметр, реагирующий на локальное изменение структуры сигнала. Данный алгоритм значительно повышает степень достоверности определения времен прихода сигналов АЭ по сравнению с методом, основанном на пороговой дискриминации [7]. При передвижении «окна» по оцифровке для параметра структуры сигнала выбиралось СКО, которое характеризовало уровень энергии [7, 9]:

$$\sigma_{j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=T_{1}}^{i=T_{2}} (x_{i} - x_{cp})^{2}}{T_{2} - T_{1} - 1}},$$

где  $T_1, T_2$  — номера отсчетов, выполняемых аналого-цифровым преобразователем и соответствующих моментам начала и окончания временного «окна»;  $x_{cp}$  — среднее значение реализации сигнала АЭ в «окне»; *i* — номер точки в массиве СКО.

Преимущество метода проявляется при обработке сложных многомодовых сигналов, когда в оцифровке присутствует несколько мод акустической волны. Подбором порогового уровня удается настроиться на определение начала сигнала в выбранной моде [7].

Двухинтервальный метод позволяет определять время прихода сигнала АЭ, совпадающее с моментом изменения его мощности. Параметр структуры A(t) сигнала АЭ записывается в виде [7]:

$$A(t) = \int_{t}^{t+T_{\text{ox}}} |U(t)| \cdot dt,$$

где U(t) — электрический сигнал АЭ; T<sub>ок</sub> — размер «окна» для расчета мощности сигнала.

Время прихода сигнала АЭ соответствует максимальному значению модифицированного двухинтервального коэффициента *K*(*t*), который находится как [8]

$$K(t) = \frac{A(t+T_{\rm ok}) - A(t-T_{\rm ok})}{A(t-T_{\rm ok})}$$

Преимущество использования двухинтервального метода состоит в том, что суммирование параметров структуры сигналов АЭ во временном «окне» практически исключает случайные выбросы. Это позволяет более точно определять время прихода  $t_0$  сигнала АЭ на соответствующий датчик ПАЭ, а, следовательно, уменьшить разброс координат дефектов и определять их автоматически [8].

Рассчитанные случайные составляющие погрешности для каждой точки ударного воздействия (см. рис. 1) определялись по формулам [10, 22]:

$$S_{xi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{cp})^2}{(n-1)}}; \quad S_{yi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - y_{cp})^2}{(n-1)}},$$

где n — число отсчетов;  $x_i$ ,  $y_i$  — измеренные значения по осям X, Y;  $x_{cp}, y_{cp}$  — средние значения по осям X, Y.

Результирующая случайная погрешность  $S_{xvi}$  для каждой точки образца находится как [22]

$$S_{xyi} = \sqrt{(S_{xi}^2 + S_{yi}^2)},$$

где  $S_{xi}$ ,  $S_{yi}$  — рассчитанные СКО координат по осям X, Y, мм.

1,8

Систематическая составляющая погрешности по каждой координате оценивалась как модуль разности координат центра кластера  $(X_i, Y_i)$  и координат  $X_{i0}, Y_{i0}$ , измеренных поверенной линейкой:

$$\Delta X_{i} = |X_{i} - X_{i0}|;$$
  
$$\Delta Y_{i} = |Y_{i} - Y_{i0}|,$$

где *i* — номер точки ударного воздействия (кластера); X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub> — измеренные координаты источника, мм.

Суммарная систематическая погрешность в каждой точке образца определялась по формуле [22]:

$$\Delta XY_i = \sqrt{(\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2)},$$

где  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  — рассчитанные систематические составляющие погрешности по осям X, Y, мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Систематическая и случайная составляющие погрешности расчета координат локации сигналов АЭ при использовании антенны, состоящей из четырех ПАЭ, усреднялись по всем точкам ударного воздействия. Результаты расчетов приведены в табл. 1, где через S1 и ∆1 обозначены случайная и систематическая погрешности, полученные при определении координат зоны локации при использовании электронного имитатора; через  $S2, \Delta 2$  — при сбросе металлического шарика диаметром d = 10 мм с высоты h = 600 мм; через S3,  $\Delta 3$  — при сбросе с высоты h = 300 мм металлического шарика диаметром d = 16 мм.

Таблица 1

10,2

антенны, состоящей из четырех ПАЭ Метод расчета РВП S1, мм Δ1, мм S2, мм Δ2, мм S3, мм Δ3, мм

3,5

6,1

7,7

5,4

Систематическая и случайная погрешности локации для различных методов расчета РВП при использовании

СКО	1,8 1,0 %	5,4 7,7 %	3,5 2,5 %	6,1 5,7 %	2,4 %	10,2 7,7 %	
Пороговый	1,7 0,6 %	5,4 1,9 %	4,3 1,6 %	6,1 2,2 %	23,4 8,4 %	22,0 7,9 %	
Двухинтервальный	7,2 2,6 %	6,7 2,4 %	9,4 3,0 %	7,9 2,7 %	23,9 8,6 %	15,6 5,6 %	

Времена прихода сигналов АЭ для быстрой моды S0 определялись методом СКО [7]. Затем по триангуляционным формулам рассчитывались значения координат источника сигналов в единицах PBI.

Для общей оценки погрешности метода измерения координат Х, У использовалось среднее значение систематической составляющей погрешности и среднее значение случайной погрешности для двух точек (см. рис. 1) ударного воздействия. Сводные значения погрешностей приведены в табл. 2, где  $\Delta_{\chi}, \Delta_{\gamma}$  — средние значения систематических погрешностей определения координат Х. Ү.

Как следует из табл. 2, систематическая составляющая погрешности увеличивается вместе со случайной составляющей. Минимальные погрешности получены при использовании электронного имитатора. Сравнивая погрешности локации сигналов АЭ при использовании различных методов расчета (см. табл. 1), можно отметить, что наименьшие средние значения систематической и случайной составляющих погрешности получены методом СКО при сбросе шарика диаметром

#### Таблица 2

Вид имитатора сигналов АЭ	Δ <sub>χ</sub> , мм	$\Delta_{\gamma}$ , мм	<i>S<sub>X</sub></i> , мм	$S_{\gamma}$ , мм
Электронный имитатор	1,4	5,2	1,0	1,5
	0,4 %	1,9 %	0,3 %	0,5 %
Имитатор Су—Нильсена	2,6	6,4	1,8	1,6
	0,7 %	2,3 %	0,5 %	0,6 %
Сброс шарика диаметром $d = 10$ мм с высоты $h = 600$ мм	2,9	5,3	2,6	2,4
	0,8 %	1,9 %	0,7 %	0,9 %
Сброс шарика диаметром $d = 10$ мм с высоты $h = 300$ мм	3,3	5,0	2,9	3,7
	0,9 %	1,8 %	0,8 %	1,3 %
Сброс шарика диаметром $d = 16$ мм с высоты $h = 600$ мм	3,2	6,8	3,7	5,4
	0,9 %	2,4 %	1,0 %	1,9 %
Сброс шарика диаметром $d = 16$ мм с высоты $h = 300$ мм	3,8	9,5	4,5	6,3
	1,1 %	3,4 %	1,3 %	2,3 %

Усредненные значения систематической и случайной погрешностей определения координат X, Y для различных имитаторов сигналов АЭ

d = 10 мм с высоты h = 600 мм. Наибольшие погрешности определения координат от ударного воздействия получены при сбросе на образец шарика диаметром 16 мм с высоты 300 мм.

Для оценки погрешности измерения времени прихода сигнала АЭ использовался двухинтервальный коэффициент. Для планарной локации сигналов АЭ при использовании антенны, состоящей из трех каналов, выбирался канал с минимальным двухинтервальным коэффициентом, так как он вносит наибольшую погрешность в расчете времен прихода. Рассчитана корреляция среднего значения этого коэффициента по точкам ударного воздействия с величиной случайной погрешности координат. Этот коэффициент соответствует соотношению сигнал/шум во временной области сигнала, где определяется время прихода.

Форма сигнала АЭ при работе имитатора значительно отличается от формы сигнала, полученного от сброса металлического шарика. При этом уменьшается амплитуда быстрой моды S0, время прихода которой считается временем прихода сигнала во всех рассматриваемых алгоритмах расчета. Основные отличия при всех методах ударного воздействия на композиционный образец заключаются в изменении соотношения амплитуд быстрой S0 и медленной A0 мод. Также отличия наблюдаются и в спектре сигналов АЭ, так как при ударных воздействиях энергия в спектре незначительно смещается в низкочастотную область (табл. 3).

Таблица 3

Параметры формы и спектра сигналов АЭ, полученных с датчика ПАЭ 3 в точке 6 (см. рис. 1) образца для различных видов воздействия

Вид имитатора сигналов АЭ	Двухинтервальный коэффициент K(t)	Отношение сигнал/ шум для быстрой моды <i>S</i> /N <sub>s0</sub>	Отношение сигнал/ шум для медленной моды <i>S</i> /N <sub>a0</sub>	Медианная частота спектра F <sub>мед</sub> , кГц	Отношение амплитуды медленной моды к быстрой моде $P_{a0 50}$
Электронный имитатор	101,8	106,6	334,3	126	3,13
Имитатор Су—Нильсена	45,6	67,02	348,6	113	5,2
Сброс шарика диаметром $d = 10$ мм с высоты $h = 600$ мм	10,88	44,75	400	111	8,94
Сброс шарика диаметром $d = 10$ мм с высоты $h = 300$ мм	7,4	36,26	420	109	11,58
Сброс шарика диаметром $d = 16$ мм с высоты $h = 600$ мм	7,55	28,26	502,2	115	17,77
Сброс шарика диаметром $d = 16 \text{ мм с высоты } h = 300 \text{ мм}$	6,35	36,58	639,58	117	17,48

В табл. З через K(t) обозначено среднее значение двухинтервального коэффициента по всем сигналам в точке начала сигнала быстрой S0 моды. Через  $S/N_{s0}$ ,  $S/N_{a0}$  обозначено отношение

сигнал/шум, определяемое отношением максимального размаха сигнала к размаху шума в предыстории для быстрой S0 и медленной A0 моды. Через  $F_{_{\rm Med}}$  обозначена медианная частота спектра сигнала AЭ, а через  $P_{_{a/s}}$  — отношение амплитуды медленной моды к амплитуде быстрой моды.

Основным отличием сигналов от ударного воздействия стального шарика является увеличение коэффициента отношения амплитуд (см. табл. 3) медленной и быстрой моды  $P_{a/s}$  и уменьшение среднего значения двухинтервального коэффициента K(t).

Для оценки погрешности определения координат источника применялась антенна, состоящая из четырех датчиков ВОД. Регистрацию сигналов АЭ осуществляли восьмиканальным модулем АЭ-системы СЦАД-16.10, где на четыре канала были подключены пьезоэлектрические датчики ПАЭ, а на другие четыре канала — датчики ВОД (см. рис. 1). Процесс автокалибровки зоны локации имел особенность, связанную с тем, что сигнал от датчиков ВОД превышал порог селекции только от ближайшего излучающего датчика ПАЭ электронного имитатора. При этом скорость звука по сигналам ВОД в процессе автокалибровки с использованием электронного имитатора определить не удалось. Скорость звука определяли при калибровке от сброса шарика в точке за пределами зоны локации на линии между парой датчиков ВОД.

На рис. 2*а* приведена форма сигнала АЭ при сбросе шарика диаметром 10 мм за пределами зоны локации между пьезоэлектрическими датчиками ПАЭ 4 и ПАЭ5, а на рис. 2*6* — форма сигнала АЭ при сбросе этого шарика между датчиками ВОД 0 и ВОД 1. Расстояние между этими датчиками равно 360 мм, скорость звуковой волны быстрой моды *S*0 по результатам измерения РВП пьезоэлектрических датчиков ПАЭ 4 и ПАЭ 5 составила  $V_x = 360 \text{ мм}/70 \text{ мкс} = 5,14 \text{ мм/мкс}.$ 



Рис. 2. Форма сигналов при калибровке зоны локации сбросом шарика диаметром 10 мм: сигнал на выходе датчика ПАЭ 4 (*a*); датчика ПАЭ 5 (б); сигнал на выходе датчика ВОД 0 (*в*); датчика ВОД 1 (*г*).

Время прихода сигнала АЭ на датчик ВОД 0 находилось надежно (рис. 2*в*). Время прихода на датчик ВОД 1 визуально определялось как *T*1 (рис. 2*г*). Для времени прихода *T*1 РВП равно 62 мкс, а скорость  $V_r = 350$  мм/62 мкс = 5,64 мм/мкс. Калибровка с использованием датчиков ВОД дает

#### Таблица 4

Номер зоны локации	Локализованные события, %	Δ <sub><i>χ</i></sub> , мм	$\Delta_{\gamma}$ мм	$S_{\chi}$ , мм	<i>S<sub>γ</sub>,</i> мм
1	98,8	4,2 1,2 %	8,6 3,1 %	2,3 0,6 %	3,3 1,2 %
2	78,1	9,7 2,7 %	32,3 11,5 %	8,9 2,5 %	31,7 11,3 %
3	61,0	36,6 10,2 %	62,3 22,3 %	7,3 2,0 %	37,8 13,5 %
4	53,7	64,6 17,9 %	68,2 24,4 %	44,0 12,2 %	56,6 20,2 %

Рассчитанные усредненные по точкам ударного воздействия значения систематической и случайной погрешности определения координат X, Y для четырех зон локации при использовании датчиков ПАЭ и ВОД

большую погрешность в определении скорости быстрой моды *S*0, поэтому для расчетов координат применялись результаты калибровки, полученные пьезодатчиками ПАЭ 4, ПАЭ 5.

Результаты расчетов координат для случая сброса шарика диаметром 10 мм с высоты 600 мм для локационных зон, составленных из комбинаций датчиков ПАЭ и ВОД, приведены в табл. 4. В данной таблице зона локации 1 составлена из четырех пьезоэлектрических датчиков ПАЭ (ПАЭ 2, ПАЭ 3, ПАЭ 4, ПАЭ 5). В зону локации 2 были включены два датчика ВОД и два пьезоэлектрических датчика ПАЭ (ВОД 0, ВОД 1, ПАЭ 2, ПАЭ 3). Зона локации 3 состояла из двух датчиков ВОД и двух пьезоэлектрических датчиков ПАЭ (ПАЭ 4, ПАЭ 5, ВОД 6, ВОД 7). Зона 4 состояла из четырех датчиков ВОД (ВОД 0, ВОД 1, ВОД 6, ВОД 7). В процессе организации различных антенн датчики ПАЭ и ВОД на образце не перемещались.

Погрешности локации в зонах 2, 3 значительно увеличиваются при включении в антенну двух датчиков ВОД по сравнению с зоной 1 (см. табл. 4). Увеличение погрешности определения координат связано с низкой амплитудой сигналов, регистрируемых датчиками ВОД, вызванной их низкой чувствительностью и погрешностями в определении времени прихода сигналов.

При использовании антенны, состоящей из четырех ПАЭ и образующей зону 1, были локализованы все ударные воздействия, наносимые в 16 точках (рис. 3*a*). Усредненная погрешность локации по всем точкам в данном случае составила 4,2 мм по оси *X* и 8,6 мм по оси *Y*. При этом локализовано было 98,8 % из всех зарегистрированных (см. табл. 4) сигналов.

Замена двух датчиков ПАЭ на датчики ВОД привела к значительному снижению точности определения координат локализованных сигналов АЭ. Были проанализированы результаты определения координат сигналов АЭ для зон локации 2 (рис. 36) и 3 (рис. 36).

Точность локации сигналов АЭ в зоне 2 была выше, чем в зоне 3 (см. табл. 4). Систематическая составляющая погрешности по оси X в зоне 2 была в четыре раза меньше, чем в зоне 3 и составила 9,7 мм. По оси Y систематическая погрешность была равна 32,3 мм, что в два раза меньше, чем в зоне 3. Кроме того, в зоне 2 было локализовано на 18 % сигналов больше, чем в зоне 3 (см. рис. 3 $\delta$ ).

На рис. Зв показаны результаты локации при использовании антенны, образующей зону 3. При этом доля локализованных сигналов АЭ снизилась до 61 % от всех зарегистрированных, а погрешности стали составлять 36,6 мм по оси X и 62,3 мм по оси Y (см. табл. 4). Максимальная суммарная амплитуда сигналов, локализованных в зоне 1, была в два раза больше, чем в зоне 3. Таким образом, включение во вторую и третью антенны различных датчиков ВОД (см. 36-6) оказывало влияние на точность результатов локации. Это определяется низкой чувствительностью и разбросом характеристик датчиков ВОД.

При использовании антенны, состоящей из четырех датчиков ВОД, не было получено локации сигналов АЭ при сбросе стального шарика массой 18,5 г на образец. Поэтому для получения устойчивой локации сигналов АЭ использовалось ударное воздействие, наносимое грузом массой m = 530 г с тупым наконечником [10]. Сброс груза выполнялся с высоты  $h_1 = 200$  мм и  $h_2 = 400$  мм. Значения энергии от падения груза массой m = 530 г по формуле (1) составили



Рис. 3. Локация сигналов АЭ при использовании пьезоантенн, состоящих из четырех ПАЭ (*a*); из двух ПАЭ и двух ВОД (б— в); из четырех ВОД (г).

 $E_1 = 1$  Дж при высоте сброса  $h_1 = 200$  мм и  $E_2 = 2$  Дж при высоте  $h_2 = 400$  мм. При этом максимальная амплитуда локализованных сигналов АЭ (рис. 3*г*) была равна 0,6 В. При сбросе груза массой m = 530 г в четыре размеченные точки 5, 8, 10 и 11 образца (см. рис. 1) позволило получить локацию, показанную на рис. 3*г*.

При нанесении ударного повреждения груз сбрасывался с высоты  $h_2 = 400$  мм. В процессе испытания было зарегистрировано 62 сигнала АЭ, из которых 28 соответствовали ударам, а остальные — отскокам груза и шумам. Для оценки погрешностей была выполнена фильтрация и выбраны только полезные сигналы. В табл. 5 приведены результаты расчета систематической и случайной погрешностей для точек 5, 8, 10, 11, показанных на рис. 1. Наибольшее значения погрешности определения координат было получено в области локации при ударе в точке 5. Суммарная систематическая составляющая погрешности составила  $\Delta_{XY} = 54,3$  мм, а суммарная случайная —  $S_{XY} = 23,2$  мм. Наиболее высокая точность наблюдалась при ударе в точке 8. При этом систематическая и случайная составляющие погрешности были равны  $\Delta_{XY} = 9,7$  мм и  $S_{XY} = 10,6$  мм. Отмечалось, что при обработке АЭ-информации, зарегистрированной датчиками ВОД, сниже-

Отмечалось, что при обработке АЭ-информации, зарегистрированной датчиками ВОД, снижение точности локации было связано с их низкой чувствительностью и как следствие этого — со сложностями определения времен прихода сигналов АЭ.

#### Таблица 5

Номер точки (см. рис. 1)	<b>Д</b> <sub><i>X</i></sub> , мм	Δ <sub>γ</sub> , мм	$S_{\chi}$ мм	<i>S<sub>γ</sub>,</i> мм	$\Delta_{\chi\gamma}$ , мм	$S_{_{XY}}$ мм
5	22,3	49,5	8,1	21,7	54,9	23,2
	6,2 %	17,7 %	2,2 %	7,8 %	18,7 %	8,1 %
8	9,1	3,5	9,0	5,6	9,7	10,6
	2,5 %	4,4 %	2,3 %	2,0 %	2,8 %	3,2 %
10	23,7	1,0	7,8	17,6	23,7	19,3
	6,6 %	0,3 %	2,2 %	6,3 %	6,6 %	6,7 %
11	8,4	8,8	22,2	7,8	12,1	23,5
	2,3 %	3,1 %	6,2 %	2,8 %	3,9 %	6,8 %

Рассчитанные значения систематической и случайной погрешности определения координат X, У при нанесении ударных повреждений в точках 5, 8, 10, 11 образца и использовании антенны, состоящей из четырех ВОД

### выводы

1. Проанализированы методики определения времен прихода сигналов АЭ на датчики антенны. Установлено, что наименьшие погрешности локации от ударов стальным шариком диаметром 10 мм с высоты 600 мм достигаются при использовании антенны, состоящей из четырех ПАЭ с применением метода СКО при определении времен прихода сигналов АЭ. При этом усредненная погрешность локации по оси X составила 4,15 мм, а по оси Y - 8,6 мм (см. табл. 4). Было локализовано 98,8 % из всех зарегистрированных сигналов. Наибольшие погрешности (см. табл. 2) определения координат от ударного воздействия получены при сбросе на образец шарика диаметром 16 мм с высоты 300 мм.

2. При испытаниях все датчики устанавливались на образец один раз, после чего за счет их различных сочетаний, были рассмотрены четыре локационные антенны. Это позволило экспериментально определить погрешности локации при нанесении ударных повреждений для четырех типов антенн и проанализировать возможности их практического использования.

3. Использование антенны, состоящей из двух датчиков ПАЭ на датчики ВОД привела к снижению точности определения координат локализованных сигналов АЭ. При этом удары наносились шариком диаметром 10 мм, сбрасываемым с высоты 600 мм. Доля локализованных сигналов АЭ снизилась до 61,0 % от всех зарегистрированных, а погрешности стали составлять 36,6 мм по оси X и 62,3 мм по оси Y.

4. В случае использования антенны, состоящей из четырех датчиков ВОД, из-за их низкой чувствительности удары, наносимые шариками, АЭ-системой не локализовались. Поэтому для исследования возможностей локации энергию удара увеличили и использовали груз массой 530 г, сбрасываемый с высоты 400 мм. При этом минимальные значения систематической и случайной погрешности составили Δ<sub>XY</sub> = 9,7 мм и S<sub>XY</sub> = 10,6 мм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фейгенбаум Ю.М., Миколайчук Ю.А., Метелкин Е.С., Батов Г.П. Место и роль неразрушающего контроля в системе поддержания летной годности композитных конструкций // Научный вестник Гос-НИИ ГА. 2015. № 9. С. 71—82.

2. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 187. С. 83—91.

3. Чернышев С.Л., Зиченков М.Ч., Смотрова С.А., Новоторцев В.М., Музафаров А.М. Технология обнаружения малозаметных ударных повреждений силовых элементов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов с использованием ударочувствительных полимерных покрытий с оптическими свойствами // Конструкции из композиционных материалов. 2018. № 4. С. 48—53.

4. Барсук В.Е., Степанова Л.Н., Чернова В.В., Кабанов С.И. Локация зон разрушения при прочностных испытаниях фюзеляжа самолета из углепластика // Полет. 2017. № 2. С. 21—26.

5. Барсук В.Е., Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Чернова В.В. Акустико-эмиссионный контроль дефектов кессона крыла самолета из углепластика в процессе статического и ударного нагружения // Полет. 2019. № 5. С. 17—24. 6. *Madaras E.* Highlights of NASA's role in developing state-of-the-art nondestructive evaluation for composites: NASA Document ID 20050050900 / Presented at the American Helicopter Sosiety Hampton Roads Chapter Structure Specialist Meeting. Williamsburg, VA, 30 Oct.—1 Nov. 2001.

7. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кареев А.Е., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Бобров А.Л., Боярркин Е.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение / Машиностроение—Полет, 2004. 368 с.

8. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Чернова В.В., Кузнецов А.Б. Локация сигналов акустической эмиссии в образцах из дюралюминия и углепластика с использованием антенны, состоящей из волоконно-оптических датчиков и пьезопреобразователей // Контроль. Диагностика. 2021. № 2. С. 18—29.

9. Степанова Л.Н., Петрова Е.С., Чернова В.В. Прочностные испытания лонжерона из углепластика с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 24—30.

10. Степанова Л.Н., Чернова В.В., Милосердова М.А. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов и кессона крыла из углепластика от ударных нагрузок // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 9. С. 4—11.

11. *Бехер С.А., Попков А.А.* Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 62—71.

12. Бочкова С.Д., Волковский С.Д., Ефимов М.Е., Дейнека И.Г., Смирнов Д.С., Литвинов Е.В. Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 73—77.

13. Башков О.В., Ромашко Р.В., Зайков В.И., Панин С.В., Безрук М.Н., Кхун Х.Х.А., Башков И.О. Детектирование сигналов акустической эмиссии волоконно-оптическими интерференционными преобразователями // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 18—25.

14. Федотов М.Ю., Будадин О.Н., Козельская С.О. Особенности технологии оптического неразрушающего контроля композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками // Конструкции из композиционных матеиалов. 2020. № 2. С. 52—55.

15. Yu F., Okabe Y., Wu Q., Shigeta N. Damage type identification based on acoustic emission detection using a fiber —optic sensor in carbon fiber reinforced plastic laminates / 32-nd European Conference on Acoustic Emission Testing. Prague, Czech Republic, September 07—09, 2016.

16. Lexmann M., Bueter A., Schwarzaupt O. Structural Health Monitoring of composite aero-space structures with Acoustic Emission // Journal of Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172–193.

17. Soman R., Wee J., Peters K. Optical Fiber Sensors for Ultrasonic Structural Health Monitoring: A Review // Sensors. 2021. V. 21 (21). P. 7345. https://doi.org/10.3390/s21217345

18. Willberry J. O., Papaelias M., Fernando G. F. Structural Health Monitoring Using Fibre Optic Acoustic Emission Sensors // Sensors. 2020. V. 20. P. 6369. DOI:10.3390/s20216369

19. Yu F., Okabe Y. Fiber-optic sensor-based remote acoustic emission measurement in a 1000 °C environment // Sensors. 2017. V. 17. P. 2908.

20. *Tada K., Yuki H.* Detection of acoustic emission signals with the fabry-perot interferometer type optical fifiber sensor // Journal of Acoustic Emission. 2017. V. 34. P. S38—S41.

21. Попков А.А., Бехер С.А. Применение пространственной корреляции параметров сигналов акустической эмиссии для решения задач кластеризации источников // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 4. С. 30—38. DOI: 10.22213/2410–9304–2020–30–38

22. Гончаров А.А., Копылов В.Д. Метрология, стандартизация и сертификация в строительстве: учебное пособие. М.: ООО Издательство «КноРус», 2022. 232 с.

### ВЫЯВЛЯЕМОСТЬ ДЕФЕКТОВ МУФТ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ МАГНИТНЫМИ, ВИХРЕТОКОВЫМ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МНОГОКРАТНО-ТЕНЕВЫМ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

© 2022 г. О.В. Муравьева<sup>1,2,\*</sup>, В.В. Муравьев<sup>1,2</sup>, М.А. Синцов<sup>1</sup>, Л.В. Волкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7 <sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34 \*E-mail: pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 24.02.2022; после доработки 07.03.2022 Принята к публикации 11.03.2022

Представлен анализ выявляемости дефектов в муфтах насосно-компрессорных труб различными методами неразрушающего контроля. Использованы методы вихретокового, магнитнопорошкового, феррозондового и ультразвукового контроля. Для уменьшения влияния качества акустического контакта на результаты контроля возбуждение и прием рэлеевских волн в многократно-теневом методе обеспечен электромагнитно-акустическим способом. Введен показатель выявляемости дефекта данного типа, определяемый соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом, и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Обоснованы информативные параметры акустического метода: «дисперсия», «многократный коэффициент выявляемости», скорость распространения рэлеевских волн. Акустический метод обеспечивает контроль всей муфты за счет однократной установки преобразователя в отличие от вихретокового, магнитнопорошкового и феррозондового методов контроля.

*Ключевые слова*: ультразвуковой многократно-теневой метод, рэлеевская волна, вихретоковый, магнитный контроль, муфты насосно-компрессорных труб.

DOI: 10.31857/S0130308222040029, EDN: BLAXOE

### введение

Важной характеристикой любого метода неразрушающего контроля является его чувствительность или возможность выявления наименьшего по размерам дефекта. Чувствительность методов неразрушающего контроля и выявляемость одного того же типа дефекта различна и зависит от особенностей метода неразрушающего контроля, условий проведения контроля, характеристик объекта контроля.

Так, выявляемость дефектов при визуальном и измерительном контроле ограничивается условиями контроля (освещенность, оптический контраст и др.), а также субъективными факторами (острота зрения, усталость, опыт работы специалиста, выполняющего контроль).

На выявляемость дефектов при магнитном контроле оказывают влияние основные параметры технологии контроля: схема намагничивания, способ контроля, вид тока намагничивания, значения напряженности поля, тип используемых индикаторов и др., а также магнитные свойства материала, шероховатость поверхности, форма и габаритные размеры объекта контроля, наличие покрытий, глубина и раскрытие трещины. Удовлетворительная чувствительность для выявления одних дефектов может быть совершенно непригодной для выявления дефектов другого характера.

Выявляемость дефекта при вихретоковом контроле зависит от глубины и ориентации плоскости дефекта относительно поверхности и в меньшей степени от ширины раскрытия усталостных трещин. Следует отметить возможность ложных срабатываний вихретокового дефектоскопа при наличии зон структурной неоднородности, приводящих к изменению электропроводности, локальных магнитных полюсов (неоднородность магнитных свойств). Максимальная чувствительность вихретокового вида контроля может быть достигнута при контроле деталей с шероховатостью поверхности не более Rz 20.

Фактором, ограничивающим выявляемость дефектов акустическим методом, является состояние и шероховатость поверхности объекта контроля, а также глубина и раскрытие трещины.

Таким образом, при выборе методов неразрушающего контроля конкретных элементов конструкций необходимо учитывать следующие основные факторы: характер (вид) возможных дефектов и их расположение; возможности методов контроля; формы и размеры контролируемых элементов конструкций; материалы, из которых изготовлены контролируемые элементы; состояние и шероховатость контролируемых поверхностей конструкций. Вопросам изучения сравнительной выявляемости дефектов методом рассеяния магнитного потока и акустическим методом в рельсовой дефектоскопии посвящены работы [1, 2]. В работе [3] исследованы вопросы сравнительной выявляемости локальных повреждений троса (обрыв проволоки) методами методом контроля рассеяния магнитного потока и с использованием датчика Холла в условиях мешающих факторов скорости сканирования датчика и вибраций троса. В работе [4] выявляемость дефектов и достоверность контроля предложено оценивать функцией PoD, описывающей зависимость вероятности обнаружения дефектов от их высоты, что дает дополнительную информацию для оптимизации методик УЗ контроля. Оценка предельной выявляемости плоскостных несплошностей толстолистового проката методами отражения (эхометод) и методами прохождения представлена в работе [5].

Элементы нефтедобывающего оборудования (насосно-компрессорные трубы и соединительные муфты) относятся к опасным производственным объектам, эксплуатируемым в агрессивных средах и при высоких уровнях нагрузок. Технология изготовления трубных заготовок предусматривает получение их методом непрерывного литья, проката или прессования с последующим сверлением. На различных этапах производственных процессов при изготовлении труб могут возникать различные типы дефектов. Одним из наиболее частых дефектов при производстве труб и муфт являются трещины напряжений, обусловленные нарушением режимов термической обработки (после закалки с последующей нормализацией или отпуском).

Трубные заготовки и насосно-компрессорные трубы, как правило, подвергаются входному, операционному и приемочному НК, основными видами которого являются вихретоковый и магнитный методы, реализуемые с использованием специализированных автоматизированных установок контроля и позволяющие выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты [6—9]. Последние неприменимы для коротких деталей (муфт насосно-компрессорных труб).

В последнее десятилетие популярными на рынке услуг НК стали волноводные методы [10], позволяющие осуществлять экспресс-диагностику прутков и труб при существенном увеличении производительности контроля за счет отсутствия сканирования и при локальном доступе к объекту.

В литературе широко освещаются вопросы использования рэлеевских волн для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов, в том числе труб, эхометодом контроля [11—25]. С целью отстройки возбуждения—приема рэлеевских волн от качества акустического контакта в ряде исследований предлагается использование электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей [26—29]. В работах [30, 31] показана возможность реализации электромагнитно-акустических объектов малых диаметров (прутки, заготовок для производства бурильных труб) для выявления поверхностных дефектов и оценке структурного состояния.

Цель данной работы — анализ выявляемости естественных трещин муфт насосно-компрессорных труб электромагнитно-акустическим методом многократной тени с использованием рэлеевских волн в сравнении с магнитными и вихретоковым методами контроля.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнительный анализ выявляемости дефектов различными методами НК проведен на четырех образцах муфт для гладких насосно-компрессорных труб (НКТ согласно ГОСТ Р 53366—2009) с условным диаметром 73 мм, толщиной стенки 5,5 мм из стали 37Г2С. Наружный диаметр муфты составляет 88,9 мм, длина 132 мм, профиль резьбы муфт соответствует ГОСТ 633—80. Муфты подвергнуты термической обработке закалкой и отпуском, в результате нарушения режимов которых на внешней поверхности двух муфт возникли протяженные трещины вдоль всей длины муфты, ориентированные под углом к образующей (образец #3 — под углом 20 град к образующей, образец #4 — под углом 30 град к образующей), две другие муфты (#1 и #2) не имеют видимых дефектов. Для визуального подтверждения дефектов три муфты (#2, #3, #4) были обточены, одна бездефектная (#1) — не подвергалась механической обработке.

При акустических исследованиях использован метод многократной тени, реализованный с использованием экспериментальной установки [32], структурная схема и фото которой представлены на рис. 1. Специализированный накладной ЭМА-преобразователь обеспечивает бесконтактное возбуждение и прием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях. Рабочая частота ЭМА-преобразователя — 1 МГц, что позволяет обнаруживать дефекты на глубине в пределах длины рэлеевской волны (до 3 мм).

Благодаря отсутствию потерь на границе «преобразователь-объект контроля» и достаточно узкой диаграмме направленности ЭМА-преобразователя рэлеевских волн возможно наблюдение



Рис. 1. Структурная схема (а), фото экспериментальной установки (б):

1 — генератор синхроимпульсов; 2 — генератор зондирующих импульсов; 3 — накладной двухканальный ЭМА-преобразователь; 4 — исследуемый образец заготовки; 5 — полосовой фильтр; 6 — высокочастотный усилитель; 7 — плата управления генератором синхроимпульсов и каналами; 8 — аналого-цифровой преобразователь; 9 — персональный компьютер с программным обеспечением ПРИНЦ.

серии многократных отражений, насчитывающих десятки импульсов. При апертуре ЭМАпреобразователя 50 мм и угле раскрытия основного лепестка диаграммы направленности ±100 (рис. 2) уже на первом прохождении по периметру объекта вся трещина (по длине образующей муфты) оказывается в поле рэлеевской волны и кратно ослабляет волну на последующих отражениях.

Серия импульсов рэлеевских волн, многократно прошедших в прямом и обратном направлениях по огибающей прутка при отсутствии дефекта и при его наличии, представлены на рис. 3. Серии характеризуются существенным сокращением количества импульсов и их амплитуд для дефектных областей объекта, что объясняется многократными двухсторонними переотражениями от дефекта. Следует отметить, что в процессе распространения рэлеевская волна дополнительно ослабляется за счет расхождения, радиального переизлучения на выпуклой цилиндрической поверхности и рассеяния на шероховатостях поверхности [33].



Рис. 2. Диаграмма направленности ЭМА-преобразователя рэлеевских волн.



Рис. 3. Эхограммы рэлеевских волн: *a* — образец #2; *б* — образец #3.

В качестве информативных параметров серии импульсов использованы вероятностные характеристики: математическое ожидание M, дисперсия D, среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ , асимметрия S, эксцесс E [34].

Также рассчитывался коэффициент многократного ослабления *K*<sub>Nd</sub> (аналог коэффициента выявляемости при ЗТМ), определяемый формулой:

$$K_{Nd} = \sum_{n=1}^{N} K_{nd} = \sum_{n=1}^{N} (U_{n0} - U_n) / U_{n0},$$
(1)

где  $U_{n0}$  — среднее значение амплитуды импульса при каждом *n*-ом прохождении для бездефектной образца муфты;  $U_n$  — значение амплитуды импульса при каждом *n*-ом прохождении для муфты с дефектом.

Вероятностно-статистические характеристики и коэффициент выявляемости рассчитываются в специализированном программном обеспечении ПРИНЦ [32]. Во избежание влияния зондирующего импульса на результаты анализа информативных параметров соответствующий ему интервал времени (от 0 до 89 мкс) удалялся из анализируемого массива. Количество анализируемых импульсов — 13.

Анализу подлежали сигналы, полученные при установке ЭМА-преобразователя рэлеевских волн по центру образующей образца при изменении угла поворота относительно начальной образующей на 45 град с целью оценки влияния качества акустического контакта на исследуемые информативные параметры. Рассчитывались средние значения информативных параметров при изменении угла поворота и среднеквадратическое отклонение каждой из характеристик.

Вихретоковый контроль, выполнен с помощью комбинированного дефектоскопа УД2-102ВД. Для возбуждения и приема вихревых токов использован вихретоковый преобразователь ПН-7.5 диаметром 7,5 мм с рабочей частотой 70 кГц. Фазовый режим работы дефектоскопа использован для оценки глубины трещин, при этом в дефектоскопе имеется отстройка от влияния шероховатости поверхности и зазора. Первоначальная настройка чувствительности дефектоскопа для оценки глубины дефекта проведена на СОП-НО-037 из марки стали 45 с шероховатостью Ra 1,25 с искусственным дефектом глубиной ИД-2 0,5 мм. Для дальнейшего уточнения изменения трещины по глубине настройка проводилась на искусственных дефектах ИД-1 глубиной 0,2 мм, ИД-2 — 0,5 мм, ИД-3 — 1 мм, ИД-4 — 2 мм в зависимости от того, к какому значению ближе была глубина трещины при первоначальной настройке. Проведена оценка распределения фазы сигнала в зоне трещины и вне ее с целью определения чувствительности к дефекту.

При реализации магнитного метода контроля использован дефектоскоп ПМД-70 и способ остаточной намагниченности СОН. Циркулярное намагничивание муфт проведено с использованием девяти витков тороидальной обмотки гибкого кабеля тремя импульсами с амплитудой тока в импульсе 1000 А.

Регистрация поля искажения над дефектом проведена феррозондовым методом с использованием градиентометра феррозондового комбинированного прибора Ф-205.30А, а также магнитопорошковым методом с использованием суспензии Диагма 1100 в концентрации 40 г на 1 л воды. С целью оценки абсолютной чувствительности методов магнитного и вихретокового контроля в сравнении с акустическим методом анализировался сигнал не только в зоне дефекта, но и вне его.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Вихретоковый метод контроля

Результаты ВТК муфт в виде распределения глубины трещины и фазы сигнала ВТП вдоль траектории трещины представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Видно, что глубина трещин в образцах меняется неравномерно и лежит в диапазоне 0,7—2,5 мм для образца #4 и 0,5—1,5 мм для образца #3. Характер изменения фазы сигнала ВТП (рис. 5) близок к характеру изменения глубины трещины.



Рис. 4. Распределение глубины трещины вдоль ее траектории относительно проекции на образующую муфты L.

Введем понятие показателя выявляемости дефекта *P*, определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом (#3 и # 4), и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец (#2). Чем больше указанное соотношение, тем выше выявляемость метода к дефекту данного типа с использованием данного информативного параметра.



Рис. 5. Распределение фазы сигнала ВТП вдоль траектории трещины относительно проекции на образующую муфты L.

При этом максимальный показатель выявляемости  $P_{EC}$  при ВТК для образца #4 составляет 35 дБ, для образца #3 — 47 дБ.

Следует отметить, что отсутствие механической обработки (образец #1) ухудшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК.

### Магнитный метод контроля

Результаты магнитопорошкового контроля исследованных образцов муфт представлены на рис. 6. Отложения порошка имеют вид индикаций неравномерной толщины. Для образца #4 наблюдается отложение порошка в виде более широкой индикации, что может быть обусловлено большим раскрытием трещины в указанной области, что не противоречит результатам ВТК (большая глубина трещины сопровождается большим раскрытием). Визуализация дефекта в образце #3 несколько хуже ввиду недостаточной чувствительности.



Рис. 6. Отложение магнитного порошка на муфтах #3 (a) и #4 ( $\delta$ ).

Феррозондовый контроль осуществлялся вдоль траектории трещины с шагом 10 мм по образующей. Результаты феррозондового контроля в виде зависимости градиента магнитного поля вдоль трещины представлены на рис. 7. Видно, что чувствительность ФЗК к трещине образца #4 существенно превышает чувствительность к трещине образца #3 (значения градиента соизмеримы с уровнем градиента поля для бездефектных образцов).



Рис. 7. Распределение градиента магнитного поля *G* вдоль траектории трещины относительно проекции на образующую муфты *L*.

Согласно рис. 7, максимальный показатель выявляемости  $P_{FZ}$  при ФЗК для образца #4 составляет 35 дБ, для образца #3 — не превышает 15 дБ. Следует отметить, что для образца #1 без механической обработки показатель выявляемости дефекта остается на том же уровне.

### Акустический метод

Результаты анализа вероятностных характеристик и коэффициента выявляемости для каждого из исследуемых образцов муфт представлены в табл. 1. Планки погрешностей на гистограммах указывают отклонение от среднего при перемещении ЭМА-преобразователя по углу относительно начальной образующей, т.е. образующей, принятой за начало отсчета.

Таблица 1

# Образца	Математическое ожидание <i>М</i> , мВ	Дисперсия <i>D</i> , мВ <sup>2</sup>	Среднеквадратическое отклонение σ, мВ	Асимметрия S	Эксцесс Е
#1	-0,677±0,023	71,2±3,6	8,31±0,42	0,528±0,069	43,7±1,9
#2	$-0,414\pm0,008$	61,8±4,9	7,85±0,31	0,702±0,073	46,5±1,6
#3	$-0,379\pm0,042$	35,0±2,0	5,91±0,16	$0,858{\pm}0,050$	71,3±1,9
#4	$-0,344\pm0,042$	11,3±0,6	3,36±0,09	0,646±0,182	52,6±11,1

Средние значения вероятностных характеристик серии импульсов рэлеевских волн

Из табл. 1 следует, что параметры «математическое ожидание», «эксцесс» и «асимметрия» не являются информативными с точки зрения дефектности образца. При этом, согласно гистограммам рис. 8, для параметра «дисперсия» (или «среднеквадратическое отклонение» имеет место уменьшение значений с ростом дефектности образца. Параметр «коэффициент выявляемости» напротив имеет тенденцию к увеличению для образцов с дефектами #3 и # 4.

Возможность выявления дефекта определяется различиями в величине информативного параметра, измеренного на образце с дефектом (#3 и # 4), и величине аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец (#2). В случае параметра «коэффициент выявляемости» бездефектный образец характеризуется величиной отклонения при изменении положения ЭМАпреобразователя по углу относительно начальной образующей.



Рис. 8. Параметр «коэффициент выявляемости» (а) и параметр «дисперсия» (б) для исследуемых образцов муфт.

Таблица 2

Значения показателя выявляемости Р<sub>А</sub> при УЗК для различных информативных параметров

Информативный параметр	Коэффициент	выявляемости	Дисперсия		
	Относительно образца #2	Относительно образца #1	Относительно образца #2	Относительно образца #1	
<i>P<sub>A</sub></i> (образец #3), раз/дБ	10,6 / 20	11,2 / 21	1,8 / 5	2,0 / 6	
<i>P</i> <sub>A</sub> (образец #4), раз/дБ	19,0 / 26	20 / 26	5,4 / 15	6,1 / 16	

В табл. 2 представлены рассчитанные значения чувствительности для исследованных информативных параметров акустического метода контроля.

Следует отметить, что отсутствие механической обработки (образец #1) существенно (на 10 дБ) улучшает показатели выявляемости дефектов при акустическом методе с использованием параметра «дисперсия» и практически не влияет на показатель выявляемости при использовании параметра «коэффициент выявляемости» в отличие от анализируемых параметров ВТК и ФЗК.

Дополнительно к анализируемым параметрам определена скорость распространения рэлеевских волн в дефектных и бездефектном образце. Результаты оценки скоростей представлены в табл. 3. С учетом погрешности определения диаметра и овальности муфт, измеренных с использованием цифрового штангенциркуля ШЦЦ-II-250-0,01 ГОСТ 166—89 GRIFF 031172, погрешность определения скорости рэлеевских волн не более 1 м/с.

Таблица 3

<b>a a</b>				~
L'UNDOCTI (	nacanacanauauua	ησαροισινά σοπι	D HOCHARVAMI IV	<b>ANNOTHOV</b>
CRUDULID C.	, распространснил	излостать ролп	Б ИССЛЕДУСМЫА	UUUASHAA

# образца	#2	#3	#4
Скорость C <sub>R</sub> , м/с	3011±1	2980±1	2976±1

Видно, что скорость рэлеевских волн падает при наличии дефекта более, чем на 30 м/с и несущественно зависит от глубины залегания дефекта. Последнее не противоречит принципу временного теневого метода и является следствием явления дифракции (огибания) волной Рэлея протяженных дефектов. Следует отметить, что завышенное значение скорости в бездефектном образце (#2), равное 3010 м/с, в сравнении с типовым значением скорости рэлеевских волн в стали 37Г2С ( $C_R$ =3000 м/с), является следствием увеличения скорости при распространении по цилиндрической поверхности [33].

Сравнительная выявляемость методов УЗК, ВТК и ФЗК может быть представлена в виде зависимости соотношения информативных параметров (градиент поля при ФЗК, фаза сигнала при ВТК, коэффициент выявляемости и дисперсия при УЗК) в области с дефектом и в области без дефекта вдоль траектории трещин (рис. 9).



Рис. 9. Сравнительные показатели выявляемости к дефектам информативных параметров методов ВТК, ФЗК и УЗК относительно бездефектной области, выраженные в дБ: образец #3 (*a*), образец #4 (*б*).

Согласно рис. 9, для дефекта малого раскрытия и малой глубины (образец #3) наилучшую выявляемость имеет акустический метод, а выявляемость методов ФЗК и ВТК практически одинакова. При этом среднее значение показателя выявляемости при УЗК  $P_A$  превышает на 6 дБ значение показателя  $P_{FC}$  при ФЗК и на 9 дБ значение  $P_{FC}$  при ВТК (табл. 4).

Так как информативные параметры ультразвукового метода характеризуются усредненными значениями по всей длине трещины, для сравнения в табл. 4 также приведены усредненные вдоль траектории трещины показатели выявляемости для методов ФЗК и ВТК.

Для дефекта с большим раскрытием и большей глубиной (образец #4) выявляемость дефекта с использованием УЗК различными видами НК становится сопоставимой с методами ВТК и ФЗК. При этом наилучшая выявляемость характеризует метод ФЗК, а наихудшая — метод ВТК. Согласно табл. 4, значение показателя  $P_{FZ}$  преобладает над значением  $P_A$  на 5 дБ и над значением  $P_{EC}$  на 11 дБ. Ухудшение выявляемости для более глубоких дефектов при УЗК в сравнении с ВТК и ФЗК обусловлено неравномерным распределением смещений в рэлеевской волне по глубине, когда увеличением глубины трещины не дает дополнительного прироста информативного параметра рэлеевской волны.

Таблица 4

# образца	$P_{EC}$	P <sub>FZ</sub>	<i>Р<sub>4</sub></i> , дБ
#3	11	14	20
#4	20	31	26

Значения усредненных показателей выявляемости при ФЗК, ВТК и УЗК

### выводы

1. Использование специализированного накладного ЭМА-преобразователя рэлеевских волн позволяет уменьшить влияние качества акустического контакта на результаты контроля, особенно для муфт с горячекатаной поверхностью.

2. Предлагаемый акустический метод многократной тени с использованием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях, в отличие от традиционных методов контроля (ФЗК и ВТК), требующих сканирования всей поверхности, обеспечивает контроль всей муфты за счет однократной установки преобразователя на образующую образца.

3. Введено понятие показателя выявляемости дефекта данного типа, определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Наибольшую чувствительность к дефектам имеют следующие информативные параметры акустического метода: параметр «дисперсия», имеющий тенденцию к уменьшению, параметр «многократный коэффициент выявляемости», имеющий тенденцию к увеличению, а также скорость распространения рэлеевских волн, имеющая тенденцию к уменьшению в образцах с дефектами.

4. Сравнительный анализ выявляемости дефектов показал, что для дефекта малого раскрытия и малой глубины (образец #3) акустический метод характеризуется наибольшим значением показателя выявляемости и превышает в среднем на 6 и 9 дБ показатели выявляемости ФЗК и ВТК методов контроля.

5. Отсутствие механической обработки (образец #1) улучшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК, ухудшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК и не влияет на показатели выявляемости при ФЗК.

6. Предлагаемый метод многократной тени с использованием рэлеевских волн может быть применим для выявления дефектов в поверхностной и подповерхностной зонах с ориентацией близкой к продольной не только в муфтах, но и насосно-компрессорных трубах, толщина которых не менее двукратной длины волны на данной частоте. При этом обеспечивается более высокая производительность за счет сканирования только вдоль образующей трубы.

Исследование выполнено с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов А.Г., Марков А.А. Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом// Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 21—29. DOI 10.1134/S0130308219040043 [Antipov A.G., Markov A.A. Detectability of Rail Defects by Magnetic Flux Leakage Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 4. P. 277—285. DOI 10.1134/S1061830919040028]

2. Марков А.А., Максимова Е.А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 2. С. 22—32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32 [Markov A.A., Maksimova E.A. Analysis of the Efficiency of Ultrasonic and Magnetic Channels of Flaw Detection Systems // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2019. V. 22. No. 2. P. 22—32. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32]

*3. Liu S., Sun Y., Jiang X., Kang Y.* Comparison and analysis of multiple signal processing methods in steel wire rope defect detection by hall sensor // Measurement. 2021. V. 171. P. 108768. DOI: 10.1016/j. measurement.2020.108768

4. Бадалян В.Г. Выявление и достоверность контроля в ультразвуковой дефектоскопии и дефектометрии // Контроль. Диагностика. 2020. № 7. С. 4—17. DOI 10.14489/td.2020.07.pp.004—017 [Badalyan V.G. Identification and reliability of control in ultrasonic flaw detection and defectometry // Kontrol'. Diagnostika. 2020. No. 7. P. 4—17. DOI: 10.14489/td.2020.07.pp.004-017]

5. Паврос К.С., Сидоренко И.Г., Рокитро Б. Сравнительная выявляемость плоскостных протяженных дефектов листового проката методами отражения и прохождения // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22. № 6. С. 75—83. DOI 10.32603/1993-8985-2019-22-6-75-83 [*Pavros K.S., Sidorenko I.G., Rockstroh B.* Comparative Detectability of Planar Extended Defects of Sheet Metal by Reflection and Transmission Methods // J. Russ. Univ. Radioelectron. 2020. V. 22. № 6. P. 75—83. DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-6-75-83]

6. *Hu B., Yu R.* Magnetic testing for inter-granular crack defect of tubing coupling // Nondestruct. Test. Eval. 2018. V. 33. No. 2. P. 119–129. DOI: 10.1080/10589759.2017.1341882

7. Шлеенков А.С., Булычев О.А., Шлеенков С.А., Новгородов Д.В. Особенности и преимущества применения анизотропных магниторезистивных датчиков поля для дефектоскопии полного объема труб малого и среднего диаметров // Дефектоскопия. 2020. № 5. С. 12—19. DOI 10.31857/S0130308220050024 [Shleenkov A.S., Bulychev O.A., Shleenkov S.A., Novgorodov D.V. Features and advantages of applying anisotropic magnetoresistive field sensors to testing the full volume of small- and medium-diameter pipes // Russ. J. Nondestruct. Test. 2020. V. 56. No. 5. P. 417—425. DOI: 10.1134/S1061830920050083]

8. Wang S., Zhao P., QU Zh., Wang K., A new system for defects inspection of boiler water wall tubes using a combination of EMAT and MFL // 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). IEEE. 2018. P. 65—69. DOI: 10.1109/FENDT.2018.8681967

9. Крюков А.С., Чегодаев В.В., Жданов А.Г., Лунин В.П. Метод определения объема произвольно расположенных локальных дефектов при вихретоковом контроле цилиндрических изделий многоэлементным преобразователем // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 46—56. [Kryukov A.S., Chegodaev V.V., Zhdanov A.G., Lunin V.P. A method for the determination of the volumes of arbitrarily-spaced local defects during eddy-current testing of cylindrical items by a multi-unit probe // Russ. J. Nondestruct. Test. 2015. V. 51. No. 12. P. 750—758. DOI: 10.1134/S1061830915120050]

10. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Мурашов С.А., Пряхин А.В. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2017. 234 с.

11. Алешин Н.П. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 22—30. DOI: 10.31857/S0130308221050031 [*Aleshin N.P.* Investigating the detectability of surface volumetric defects in ultrasonic testing with the use of rayleigh waves generated by an electromagnetic-acoustic transducer // Russ. J. Nondestruct. Test. 2021. V. 57. No. 5. P. 361—368. DOI: 10.1134/S1061830921050028]

12. *Liu X*. Surface crack identification on a cylinder using the signal enhancement of the scanning laser line source method // Appl. Sci. 2018. V. 8. No. 10. P. 1796. DOI: 10.3390/app8101796

13. *He C., Deng P., Lu Y., Liu X., Liu Z., Jiao J., Wu B.* Estimation of Surface Crack Depth using Rayleigh Waves by Electromagnetic Acoustic Transducers // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2017. V. 22 (4). P. 541—548. DOI:10.20855/ijav.2017.22.4501

14. Углов А.Л., Хлыбов А.А., Бычков А.Л., Кувшинов М.О. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03H17K10B10MT // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 3—9. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9 [Uglov A.L., Khlybov A.A., Bychkov A.L., Kuvshinov M.O. About non-destructive control of residual stresses in axisymmetric parts made of steel 03Ni17Co10W10MoTi // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2019. V. 22. No. 4. P. 3—9. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9]

15. *Cheng L.* Crack characterisation using invariable feature extraction in stainless steel specimen used for absorber tubes of CSP applications via EMAT // Renew. Energy. 2017. V. 101. P. 771—781. DOI: 10.1016/j. renene.2016.09.036

16. *Kim C*. Evaluating rolling contact fatigue damage precursors with Rayleigh waves in 1060 steel // J. Nondestruct. Eval. 2021. V. 40. No. 4. P. 91. DOI:10.1007/s10921-021-00828-z

17. Муравьев В. В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 2. С. 37—43. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43 [*Murav'ev V.V., Budrin A.Y., Sintsov M.A.* Structuroscopy of Heat-Treated Steel Bars by the Speed of Propagation of Rayleigh Waves // Intellekt. Sist. Proizv. 2020. V. 18. No. 2. P. 37—43. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43]

18. Муравьев В.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 4. С. 4—10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10 [*Murav'ev V.V., Budrin A.Y., Sintsov M.A.* Influence of High-Cycle Fatigue on the Speed of Shear and Rayleigh Waves in Steel Bars of Different Heat Treatment // Intellekt. Sist. Proizv. 2020. V. 18. No. 4. P. 4—10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10]

19. Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В. Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката // Сталь. 2021. № 5. С. 36—41. [Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Nonuniformity of Acoustic Anisotropy of Thick-Sheet Steel // Steel in Translation. 2021. V. 51. No. 5. P. 335—341. DOI: 10.3103/S0967091221050120]

20. Vakhguelt A., Syswoio Jo R., Bergander M.J. Electromagnetic acoustic boiler tubes inspection with robotic device // Vibroengineering PROCEDIA. 2017. V. 15. P. 115—118. DOI: 10.21595/vp.2017.19453

21. Zhang Z., Zhao J., Pan Y. Surface circular-arc defects interacted by laser-generated Rayleigh wave // Ultrasonics. 2020. V. 103. P. 106085. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106085

22. Ahmad M. Characterization of surface crack width in plates using Rayleigh wave electromagnetic acoustic transducers // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2021. V. 1043. No. 4. P. 042038. DOI: 10.1088/1757-899X/1043/4/042038

23. *Ducousso M., Reverdy F.* Real-time imaging of microcracks on metallic surface using total focusing method and plane wave imaging with Rayleigh waves // NDT E Int. 2020. V. 116. P. 102311. DOI: 10.1016/j. ndteint.2020.102311

24. *Trushkevych O., Edwards R.S.* Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system // NDT & E International. 2019. V. 107 P. 102140. DOI:10.1016/j.ndteint.2019.102140

25. *Thring C.B.* The effect of EMAT coil geometry on the Rayleigh wave frequency behaviour // Ultrasonics. 2019. V. 99. P. 105945. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.06.007

26. Петров К.В., Соков М.Ю., Муравьева О.В. Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов // Вестник Ижевского государственного технического университета. Т. 21. № 2. 2018. С. 135—146. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146 [*Petrov K.V., Sokov M.Y., Muraveva O.V.* The Effect of Electromagnetic Acoustic Transducer Design Features on Results of Cylinder Object Testing // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2018. V. 21. No. 2. P. 135. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146]

27. Стрижак В.А., Хасанов Р.Р., Пряхин А.В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 159—166. [Strizhak V.A., Hasanov R.R., Pryakhin A. V. Features of Excitation of an Electromagnetic Acoustic Transducer under a Waveguide Method of Testing // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2018. V. 21. No. 2. P. 159—166. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166]

28. *Tu J*. An external through type RA-EMAT for steel pipe inspection // Sensors Actuators A: Phys. 2021. V. 331. P. 113053. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113053

29. Vakhguelt A., Kapayeva S. D., Bergander M.J. Combination non-destructive test (NDT) method for early damage detection and condition assessment of boiler tubes // Procedia Engineering. 2017. V. 188. P. 125–132. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.465.

30. *Муравьева О.В., Зорин В.А.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 3—9. [*Murav'eva O.V., Zorin V.A.* The multiple shadow method applied to testing cylindrical objects with Rayleigh waves // Russ. J. Nondestruct. Test. 2017. V. 53. No. 5. P. 337—342. DOI: 10.1134/S1061830917050059]

31. Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 48—57. DOI: 10.31857/S0130308220120052 [*Muravieva O.V., Volkova L.V., Muraviev V.V., Sintsov M.A., Myshkin Yu.V., Basharova A.F.* Sensitivity of electromagnetic-acoustic multiple shadow method using rayleigh waves in inspection of oil country tubular goods. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 12. P. 995—1004. DOI: 10.1134/S1061830920120050]

32. Стрижак В.А., Пряхин А.В., Хасанов Р.Р., Ефремов А.Б. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 6. С. 565—571 DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571 [Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Khasanov R.R., Efremov A.B. Hardware-software complex for rods control by mirror-shadow method using multiple reflections // Journal of instrument engineering. 2017. V. 60. No. 6. P. 565—571. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571]

33. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 288 с.

34. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Габбасова М.А., Булдакова И.В., Соков М.Ю. Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом // Автометрия. 2016. Т. 52. № 4. С. 62—70. DOI 10.15372/AUT20160408 [*Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Gabbasova M.A., Buldakova I.V., Sokov M.Y.* Analysis of reflected signals in testing cylindrical specimens by the multiple reflection echo-shadow method // Optoelectron. Instrum. Data Process. 2016. V. 52. No. 4. P. 367–373. DOI: 10.3103/S8756699016040087]

Дефектоскопия № 4 2022

### КОНТРОЛЬ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ГИБКОГО БЕТОНА, СОДЕРЖАЩЕГО КЕРАМИЧЕСКИЕ ОТХОДЫ, МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2022 г. Ву Липэн<sup>1, 2, 3, \*</sup>, Ли Чжэнчжэн<sup>2</sup>, Лиу Чанг Хонг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственная ведущая лаборатория по безопасности строительства и окружающей городской среде, Китай Пекин 100013

<sup>2</sup>Университет Шицзячжуан Тедао, Китай Шицзячжуан, 050043

<sup>3</sup>Национальный инженерно-исследовательский центр строительных технологий, Китай Пекин 100013 \*E-mail: lipengwu@outlook.com

> Поступила в редакцию 07.01.2022; после доработки 11.02.2022 Принята к публикации 11.02.2022

Материалы на основе цемента, армированного волокном, получили широкое распространение в области повышения прочности конструкций. С использованием измельченного керамического порошка для замены части цемента и измельченной керамики для полной замены кварцевого песка был получен экологически чистый материал на основе цемента. Новый тип гибкого бетона Cera-ECC был получен при добавлении соответствующего количества поливинилспиртового (ПВС) волокна. Электрокоррозия использовалась для изучения коррозии стальных стержней в Cera-ECC и изучения процесса повреждения окружающего стержни гибкого бетона (ГБ) с использованием метода акустической эмиссии. Установлено, что введение керамического порошка в соответствующем количестве позволяет сформировать устойчивую пассивную пленку на поверхности стального стержня. Накопление импульсов акустической эмиссии во времени показывает, что процесс повреждения можно разделить на пять стадий: до депассивации, разрыв пассивной пленки, накопление и растрескивание, образование макроскопических трещин. Сигналы на разных стадиях повреждения имеют разные спектральные характеристики. По мере увеличения повреждения пиковая частота сигнала акустической эмиссии постепенно меняется от низкой к высокой. С увеличением содержания волокна время до появления макротрещин эффективно продлевается.

*Ключевые слова*: керамические отходы, коррозионные повреждения, акустическая эмиссия, гибкий цемент, материалы на основе цемента.

DOI: 10.31857/S0130308222040030, EDN: BLDSUM

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Железобетон является наиболее широко используемым типом конструкций в области гражданского строительства во всем мире. Из-за влияния таких факторов, как окружающая среда и нагрузка, его долговечность всегда была в центре внимания многих исследователей [1]. Коррозия стальных стержней, вызванная ионами хлора или карбонизацией, является основной проблемой для увеличения долговечности такого бетона [2]. В результате коррозии стальных стержней несущая способность конструкции снижается, а также нарушается целостность, что особенно влияет на безопасность конструкции.

Материалы на основе цемента, армированного волокном, особенно ГБ, находят все более широкое применение с целью восстановления и повышения прочности бетонных конструкций [3]. Цемент и кварцевый песок тралиционно являются необходимыми материалами для изготовления ГБ. Углеродосодержащие выбросы от производства цемента составляют около 5-7 % мировых выбросов [4]; во многих местах становится все труднее добывать кварцевый песок. С другой стороны, при производстве керамики и при демонтаже существующих конструкций, содержащих керамику, образуется большое количество керамических отходов [5, 6]. Эти отходы являются неорганическими и не могут разлагаться естественным путем. Их неправильная утилизация не только занимает большую территорию, но и может привести к загрязнению воздуха, воды и почвы. В последние годы применение керамических отходов при производстве бетона достигло определенного прогресса. Некоторые исследования показали, что при использовании порошка керамических отходов в качестве замены части цемента при изготовлении бетона прочность и долговечность бетона не уменьшаются и даже могут быть увеличены. Конструкционные бетоны с заменой портландцемента на 20-40 % отходов красной керамики показали лучшие показатели с точки зрения экологической эффективности [7]. Порошок из отходов керамической плитки (ПОКП) использовался для частичной замены цемента при приготовлении низкоуглеродистого бетона со сверхвысокими характеристиками (БСВХ). Прочность на сжатие и изгиб у БСВХ с 15—55 % ПОКП оказалась выше 120 и 14 МПа через 28 дней [8]. При одновременном включении ПОКП и доменного шлака свойства бетона значительно улучшаются [6]. Использование керамических отходов в качестве заполнителей в производстве бетона привлекает все большее внимание, становится возможным производство бетона средней и высокой прочности с включением керамических заполнителей вместо природного заполнителя, при этом характеристики прочности на сжатие и водопроницаемость могут удовлетворять требуемым критериям [5]. Бетоны, модифицированные крупными и мелкими керамическими наполнителями, отличались различным улучшением механических свойств и устойчивостью к циклам замораживания—оттаивания [9]. Использование отходов керамической плитки улучшает поведение смесей, подвергающихся воздействию высоких температур [10]. Прочность на сжатие и стойкость к карбонизации могут быть значительно улучшены, если в качестве внутреннего отвердителя используются пористые крупные заполнители в виде керамических отходов [11], керамические отходы тонкого костяного фарфора могут быть использованы в качестве заполнителя для производства прочного и упругого бетона [12].

На данный момент имеется небольшое количество исследований коррозии стальных стержней в ГБ и последующего повреждения. В качестве широко используемых методов исследования коррозии металлов применяют: метод потенциалов полуэлемента (ППЭ) [13], метод линейного поляризационного сопротивления (ЛПС) [14], электрохимический шум [15], измерение деформации на волоконной брэгговской решетке [16], электромагнитные датчики [17], а электрохимическую импедансную спектроскопию (ЭИС) [18] часто используют в исследованиях коррозии стальных стержней в бетоне. В последние годы внимание исследователей также привлекли рентгеновская компьютерная микротомография высокого разрешения и акустическая эмиссия (АЭ) [19, 20]. В данной работе при приготовлении ГБ использовались отходы керамики. Был изобретен новый тип экологически чистого ГБ (Сега-ЕСС). С помощью технологии коррозии внешним током и акустической эмиссии исследовано коррозионное поведение стержней из обычной низкоуглеродистой стали в ГБ и развитие возникающих в результате повреждений.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

### 2.1. Материалы и соотношение смесей

Цемент, описанный в данной работе, это стандартный портландцемент марки P.O42.5 (Hebei Zanhuang Jinyu Cement Co., Ltd.). Измельченный керамический порошок (из сломанной напольной плитки, Gaoyi Lima Ceramics Co., Ltd.) использовался в качестве вспомогательного компонента цемента. Измельченную керамическую плитку с размером частиц около 0,1 мм помещали в шаровую мельницу и измельчали шарами из оксида алюминия в течение двух часов. Размер большинства частиц полученного молотого керамического порошка составляет менее 50 микрон, а распределение частиц по размерам близко к таковому у обычного портландцемента (рис. 1). Содержание более мелких частиц несколько превосходит их количество в обычном портландцементе. Керамический песок был получен путем дробления напольной плитки, размер его частиц составляет от 0,075 до 0,15 мм. Внешний вид измельченного керамического порошка и измельченного керамического песка показан на рис. 1. Гранулометрический состав цемента и керамического порошка дан в табл. 1.



Рис. 1. Керамический песок (слева) и керамический порошок (справа).



Рис. 2. Распределение частиц по размерам в материалах для изготовления цемента.

В табл. 1 можно отметить, что содержание CaO в измельченном керамическом порошке менее 2 %, что сильно меньше содержания CaO в цементе P.O42.5 (обычно около 60 %). Это может стать веской причиной того, почему измельченный керамический порошок не может гидратироваться при воздействии воды. Содержания SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в керамическом порошке сильно больше, чем в стандартном портландцементе P.O42.5.

Таблица 1

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO3	Cl
Керамический порошок	68,26	17,10	1,55	0,72	1,41	2,20	2,01	-	0,06
Цемент Р.О.42.5	23,71	7,20	59,1	3,08	2,09	0,16	0,61	2,16	0,01

Химический состав исходных веществ, %

В качестве волокна использовалось ПВС-волокно, показанное на рис. 3, а его геометрические и механические параметры указаны в табл. 2.

Соотношение компонентов в смеси нового ГБ показано в табл. 3.

Использовался горячекатаный стальной стержень номинального диаметра 16 мм. Для каждого набора соотношений смеси готовили по два образца. Цилиндрические образцы ГБ имеют диаметр



Рис. 3. ПВС-волокно.

#### Таблица 2

Волокно	Диаметр, мкм	Длина, мм	Прочность на растяжение, МПа	Удлинение, %	Модуль упругости, ГПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
ПВС	40	8	1560	6.5	41	1300

#### Свойства ПВС-волокна

Таблица З

N⁰	Цемент	Керамический порошок	Керамический песок	Вода	В/Ц	ПВС-волокно	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на растяжение, МПа
v-f-10	0,7	0,3	0,3	0,27	0,27	1,0 %	56,3	1,97
v-f-15	0,7	0,3	0,3	0,27	0,27	1,5 %	55,8	2,97
v-f-20	0,7	0,3	0,3	0,27	0,27	2,0 %	53,6	4,81

100 мм и длину 200 мм. После извлечения из формы образцы были перемещены в камеру для стандартного выдерживания на 28 дней. Затем открытая часть стального стержня была отполирована для удаления следов коррозии и пятен, а к полированным стальным стержням с помощью изоляционной ленты была присоединена медная проволока, а для герметизации неподготовленных к коррозии участков использовалась эпоксидная смола.

### 2.2. Метод ускорения коррозии внешним током

В данной работе применялся метод ускорения коррозии образца внешним током, погруженного в соляной раствор. Перед испытанием образец погружали в 3 %-раствор NaCl на 48—72 ч, чтобы бетон приобрел электрическую проводимость. Стальной стержень и круглая железная проволока подключены к положительному и отрицательному полюсу источника питания постоянного тока соответственно, как показано на рис. 4. Во время испытаний плотность тока коррозии установлена на уровне 2 мA/см<sup>2</sup>. После появления на поверхности образца макроскопических трещин процедура коррозии внешним током останавливалась.



Рис. 4. Внешний вид установки по испытанию на ускоренную коррозию.

### 2.3. Метод акустической эмиссии

Использовали систему сбора и хранения сигналов акустической эмиссии AMSY-6, а в качестве датчика использовался VS45-H. Это пассивный пьезоэлектрический АЭ-датчик с широкой частотной характеристикой. Пик его частотной характеристики — 280 кГц, а частотный диапазон находится в пределах от 20 до 450 кГц. Это широкополосный АЭ-датчик, охватывающий низкочастотный и стандартный частотный диапазоны. Порог был установлен 40 дБ в соответствии с определенным уровнем шума в окружающей среде. Коэффициент усиления предусилителя был выбран — 40 дБ. Частота дискретизации составляла 5 МГц. Во время испытаний датчик VS45-H закреплялся на верхней поверхности стального стержня с помощью контактной жидкости (как показано на рис. 4).

### 2.4. Измерение потенциала коррозии

Двойной электрический слой формировался благодаря взаимодействию между стальным стержнем и окружающей средой, а разность потенциалов возникала на обоих сторонах границы раздела. Разность потенциалов может отражать состояние стального стержня. Метод потенциала коррозии определяет признак коррозии стального стержня по измерению относительной разности потенциалов между электродом стального стержня и эталонного электрода. Дискриминантное соотношение между потенциалом и состоянием коррозии показано в табл. 4.

Таблица 4

Дискриминантное соотношение между потенциалом и состоянием коррозии стального стержня

Потенциал НКЭ	Состояние коррозии
>-126 мВ	Низкая (10 % риск)
От -126 до -276 мВ	Средная коррозия
< -276 мВ	Высокая (<90 % риск)
<-426 мВ	Сильная коррозия
< -426 мВ	Сильная коррозия

Насыщенный каломельный электрод (НКЭ) использовали в качестве эталонного электрода при измерении потенциала коррозии. Цифровой мультиметр Agilent 34401A применяли для измерения потенциала.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

### 3.1. Анализ параметров сигнала акустической эмиссии

Накопленное значение импульсов и энергии сигнала акустической эмиссии в течении полного процесса разрушения, вызванного коррозией в Cera-ECC с различным содержанием волокна, показаны на рис. 5.

Процесс повреждения был разделен на пять этапов, исходя из тенденции изменения накопления импульсов и энергии акустической эмиссии.

Первый этап — этап перед депассивацией. Из рис. 5 видно, что на ранней стадии испытания на ускоренную коррозию наблюдается короткий период быстрого роста на кривой накопления импульсов и кривой накопления энергии, а затем проявляется медленный рост, в течение которого сигнал акустической эмиссии практически не увеличивается. Это может быть вызвано тем, что после активации поверхности возникает небольшой участок локальной точечной коррозии, после чего диффузия продуктов коррозии затрудняется. Также может иметь место образование и лопание пузырей, которые также могут вносить свой вклад. На данном этапе никаких повреждений внутри ГБ не происходит.

Вторая стадия — депассивация, что является начальной стадией коррозии стали. Из рис. 5 видно, что кривая накопленных импульсов значительно увеличивается, в то время как кривая накопления энергии явно не стремится к увеличению. Кроме того, показано, что стальной стержень



Рис. 5. Параметры акустической эмиссии в течение процесса коррозионного разрушения: v-f-10 (*a*); v-f-15 (*б*); v-f-20 (*в*).

имеет средний уровень коррозионного риска. Поэтому считается, что на этой стадии пассивная пленка разрушается, и стальные стержни начинают подвергаться коррозии, а поскольку воды и кислорода достаточно, то скорость коррозии относительно высока, а продукты коррозии начинают быстро заполнять поры на границе раздела между стальным стержнем и ГБ.

Третья стадия — стадия накопления продуктов коррозии. Из рис. 5 видно, что на этом этапе накопление импульсов акустической эмиссии увеличивается, а накопление энергии увеличивается относительно медленно. Предполагается, что по мере увеличения количества продуктов коррозии на этой стадии они продолжают накапливаться на поверхности стального стержня, а зазор между стальным стержнем и окружающей поры областью заполняется, затем продукты коррозии уплотняются. Начинают проявляться окружные растягивающие напряжения в ГБ. Количество кислорода, необходимого для коррозии внутри образца, уменьшается, поэтому процесс коррозии подавляется и замедляется.

Четвертая стадия — стадия образования трещин в ГБ. Из рис. 5 видно, что на данном этапе как кривая накопления импульсов, так и кривая накопления энергии имеют большой рост и начинают явно увеличиваться. Процесс акустической эмиссии отличается высокой активностью и высокой интенсивностью. Предполагается, что с непрерывным увеличением объема продуктов коррозии растягивающие напряжения ГБ продолжают увеличиваться, и, наконец, ГБ вокруг стального стержня начинает растрескиваться. После того, как защитный слой ГБ растрескается, кислород будет легче поступать, а скорость коррозии также увеличится.

Пятая стадия — стадия образования поверхностных макроскопических трещин. Из рис. 5 видно, что на данном этапе кривая накопления импульсов и кривая накопления энергии продолжают расти, но скорость роста снижается по сравнению с предыдущим этапом. Это говорит о том,

что при образовании трещин скорость распространения коррозии увеличивается, а продукты коррозии начинают заполнять трещины. При непрерывном накоплении продуктов коррозии ширина трещин коррозионного расширения еще больше увеличивается, и, наконец, трещины будут пронизывать всю поверхность вдоль продольного направления стального стержня.

Время старта и конца каждого этапа для ГБ с различным содержанием волокна показаны в табл. 5.

Таблица 5

Содержание волокна	Этап 1, ч Этап 2, ч		Этап 3, ч	Этап 4, ч	Этап 5, ч
v-f-10	0—9	9—15	15—53	53—60	60—63
v-f-15	0—12	12—24	24—44	44—65	65—78
v-f-20	0—34	34—85	85—108	108—260	260—370

#### Этапы повреждения, вызванного коррозией

#### 3.2. Потенциал коррозии

Изменения в коррозионном потенциале могут свидетельстваовать о состоянии стального стержня так же, как и о чувствительности к коррозии стального стержня в коррозионной среде. Изменение коррозионного потенциала во времени в течение всего процесса повреждения стали, вызванного действием коррозии, в Cera-ECC с различным содержанием волокна показано на рис. 6.



Рис. 6. Изменение коррозионного потенциала стальных стержней в ГБ с различным содержанием волокна.

Из рис. 6 видно, что для каждого содержания волокна после 28 дней стандартной выдержки стальные стержни имеют низкий риск коррозии до применения метода ускоренной коррозии, что указывает на то, что на поверхности стержня уже имеется стабильная пассивирующая пленка. По сравнению с низким содержанием волокна, стальные стержни легче входят в активированное состояние при среднем и высоком содержании волокна. Это может быть связано с тем, что с увеличением содержания волокна увеличивается и объем, занимаемый пористой межфазной переходной зоной между волокном и матрицей, что облегчает действие благоприятных факторов коррозии. Однако с увеличением содержания волокна волокна снижение потенциала разомкнутой цепи на более поздней стадии имеет тенденцию к замедлению, что указывает на то, что перекрывающее действие волокон ограничивает расширение трещин в матрице ГБ и может замедлять скорость коррозии.

### 3.3. Частотный анализ сигнала акустической эмиссии

Зарегистрированные сигналы акустической эмиссии состоят из серии наложенных волн различных частот и различных фаз. Анализ во временной области не может полностью отразить полную картину формы волны акустической эмиссии; необходим анализ в частотной области, чтобы различить источник сигнала акустической эмиссии.

Весь процесс коррозионного повреждения подразделялся на пять этапов, а затем проводился анализ потенциала коррозии. Для конкретных пяти этапов выбираются типичные сигналы для выполнения анализа в частотной области. Из анализа спектрограммы на рис. 7 видно, что частотное распределение до разрыва пассивной пленки стального стержня примерно такое же, а энерговыделение на этом этапе невелико. По мере развития коррозии существенно изменяются как частотный спектр, так и энергия. В данном исследовании механизмы акустической эмиссии разделены на пять типов, а именно: выделение пузырьков водорода, разрыв пассивной пленки, растрескивание матрицы, проскальзывание на границе раздела волокно—матрица и разрыв волокна. Согласно результатам соответствующих исследований, максимальная частота каждого механизма показана в табл. 6.

Максимальная частота, кГц Разрыв пассивной Образование Растрескивание Отслоение Разрыв волокна пузырьков водорода пленки матрицы <90 [21] <150 [22] 100~300 [23] 270~330 [24] 300~500 [25] а б 300 250 Средняя частота, кГц Средняя частота, кГц 250 200 200 150 150 100 30 10 20 40 70 50 60 0 20 30 50 0 10 40 60 70 80 Длительность ускоренной коррозии, ч Длительность ускоренной коррозии, ч 450 Средняя частота, кГц 400 300 250 200 150 100 50 100 150 200 250 300 350 400 0 Длительность ускоренной коррозии, ч

#### Максимальная частота источников АЭ

Таблица 6

Рис. 7. Зависимость между средней максимальной частотой и длительностью ускоренной коррозии: v-f-10 (*a*); v-f-15 (*б*); v-f-20 (*в*).

Из рис. 7 видно, что средняя максимальная частота на разных этапах различна. На ровной части кривой средняя максимальная частота находится в диапазоне от 125 до 150 кГц. В сочетании с типичным диапазоном пиковых частот источника акустической эмиссии (см. в табл. 6) выделение пузырьков водорода и разрыв пассивной пленки происходят одновременно друг с другом с высокой вероятностью. В случае малого содержания волокна общая максимальная частота ниже, что может быть связано с тем, что переходная зона на границе раздела между волокном и матрицей занимает меньший объем, а водороду и опасным ионам труднее перемещаться. В случае высокого содержания ПВС-волокна гладкий участок становится заметно длиннее. Это может быть связано с наличием волокон, которые выдерживают круговое растягивающее напряжение в матрице, так что трещины в матрице трудно распространяются, а распространение трещины будет производить сигнал акустической эмиссии с высокой максимальной частотой. Как только матрица трескается, это должно сопровождаться отслоением волокна, что будет давать сигнал акустической эмиссии с более высокой максимальной частотой. Из рис. 7 видно, что с увеличением содержания волокна максимальная частота сигнала акустической эмиссии также будет увеличиваться, когда в испытательном образце вот-вот появятся сквозные трещины. Это может быть объяснено растяжением и разрывом большого количества волокон. Кроме того, в случае высокого содержания волокна участок резкого подъема и последующий плавный участок кривой средней пиковой частоты также длиннее по сравнению со случаем среднего и низкого содержания волокон, что также вызвано тем, что большее количество волокон растягивается и рвется.

Высокое содержание волокна не может способствовать формированию пассивной пленки стального стержня. Это связано с тем, что высокое содержание волокон увеличивает объем переходной зоны волокно—матрица, а переходная зона границы раздела является относительно непрочной по отношению к матрице, что может легко привести к проникновению опасных ионов. И это приведет к разрыву пассивной пленки стального стержня. Однако высокое содержание волокон помогает ограничить растрескивание матрицы. Из рис. 5 и 7 видно, что более высокое содержание волокна значительно увеличивает время появления сквозных трещин на поверхности ГБ.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании измельченного керамического порошка с концентрацией 30 % в цементе и измельченного керамического песка с целью полной замены кварцевого песка, а также добавления ПВС-волокон был получен новый тип ГБ (Cera-ECC). Стабильная пассивная пленка может быть получена на поверхности стального стержня в данном типе ГБ.

Механизмы коррозии арматуры и последующее образование трещин в новом типе ГБ были изучены с использованием методики акустической эмиссии посредством электроускоренной коррозии. Процесс повреждения разделялся на пять этапов, и в сочетании с накоплением импульсов акустической эмиссии и выделением энергии были обсуждены характеристики повреждения на каждой стадии. Низкое содержание волокон помогает предотвратить коррозию стальных стержней, а высокое содержание волокон помогает контролировать растрескивание матрицы ГБ после образования коррозии.

В сочетании со средней максимальной частотой полученных сигналов акустической эмиссии методика акустической эмиссии может использоваться для мониторинга развития коррозии стали и последующего повреждения в ГБ в режиме реального времени.

Авторы выражают признательность финансовой поддержке данного исследования фонду государственной ведущей лаборатории безопасности строительства (BSBE2019-07) и фонду естественных наук провинции Хэбэй (E2021210088).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li J.Q.* et al. Durability of ultra-high performance concrete: A review // Construction and Building Materials. 2020.V. 255. P. 119296.

2. *Qu F.L.* et al. Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review // Journal of Building Engineering. 2021. V. 35. P. 102074.

3. *Zheng A.H.* et al. Experimental investigation of corrosion-damaged RC beams strengthened in flexure with FRP grid-reinforced ECC matrix composites // Engineering Structures. 2021. V. 244. P. 112779.

4. Naqi A., Jang J.G. Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A review // Sustainability. 2019. V. 11 (2). P. 537.

5. *Ray S.* et al. Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review // Journal of Building Engineering. 2021. V. 43. P. 102567.

6. *AlArab A., Hamad B., Assaad J.J.* Strength and Durability of Concrete Containing Ceramic Waste Powder and Blast Furnace Slag // Journal of Materials in Civil Engineering. 2022. V. 34 (1). P. 04021392.

7. *Pavesi T.B., Rohden A.B., Garcez M.N.R.* Supporting circular economy through the use of red ceramic waste as supplementary cementitious material in structural concrete // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2021. V. 23 (6). P. 2278–2296.

8. Xu K.C. et al. Mechanical properties of low-carbon ultrahigh-performance concrete with ceramic tile waste powder // Construction and Building Materials. 2021. V. 287. P. 123036.

9. *Katzer J.* et al. Influence of Varied Waste Ceramic Fillers on the Resistance of Concrete to Freeze-Thaw Cycles // Materials. 2021. V. 14 (3). P. 624.

10. *Hilal N.N., Mohammed A.S., Ali T.K.M.* Properties of Eco-Friendly Concrete Contained Limestone and Ceramic Tiles Waste Exposed To High Temperature // Arabian Journal for Science and Engineering. 2020. V. 45 (5). P. 4387—4404.

11. *Ogawa Y.* et al. Effects of porous ceramic roof tile waste aggregate on strength development and carbonation resistance of steam-cured fly ash concrete // Construction and Building Materials. 2020. V. 236. P. 117462.

12. *Siddique S., Shrivastava S., Chaudhary S.* Influence of Ceramic Waste as Fine Aggregate in Concrete: Pozzolanic, XRD, FT-IR, and NMR Investigations // Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. V. 30 (9). P. 04018227.

13. *Zou Z.H.* et al. Relationship between half-cell potential and corrosion level of rebar in concrete // Corrosion Engineering Science and Technology. 2016. V. 51 (8). P. 588—595.

14. *Da B*. et al. Reinforcement corrosion research based on the linear polarization resistance method for coral aggregate seawater concrete in a marine environment // Anti-Corrosion Methods and Materials. 2018. V. 65 (5). P. 458—470.

15. *Hu J.Y.* et al. Electrochemical noise analysis of cathodically protected steel reinforcement in concrete using carbon fiber sheet as anode // Construction and Building Materials. 2021.V. 133. P. 125474.

16. *Li W.J.* et al. Monitoring Concrete Deterioration Due to Reinforcement Corrosion by Integrating Acoustic Emission and FBG Strain Measurements // Sensors. 2017. V. 17 (3). P. 657.

17. *Li Z*. et al. Combined application of novel electromagnetic sensors and acoustic emission apparatus to monitor corrosion process of reinforced bars in concrete // Construction and Building Materials. 2020. V. 245. P. 118472.

18. *Hoshi Y*. et al. Non-Contact Measurement to Detect Steel Rebar Corrosion in Reinforced Concrete by Electrochemical Impedance Spectroscopy // Journal of the Electrochemical Society. 2019. V. 166 (11). P. C3316—C3319.

19. *Qiu Q.W., Zhu J.H., Dai J.G.* In-situ X-ray microcomputed tomography monitoring of steel corrosion in engineered cementitious composite (ECC) // Construction and Building Materials. 2020. V. 262. P. 120844.

20. *Abouhussien A.A., Hassan A.A.A.* Acoustic Emission Monitoring of Corrosion Damage Propagation in Large-Scale Reinforced Concrete Beams // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2018. V. 32 (2). P. 04017133.

21. Goldaran R., Turer A. Application of acoustic emission for damage classification and assessment of corrosion in pre-stressed concrete pipes // Measurement. 2020. V. 160. P. 107855.

22. Jirarungsatian C., Prateepasen A. Pitting and uniform corrosion source recognition using acoustic emission parameters // Corrosion Science. 2010. V. 52 (1). P. 187–197.

23. *Farnam Y.* et al. Acoustic emission waveform characterization of crack origin and mode in fractured and ASR damaged concrete // Cement & Concrete Composites. 2015. V. 60. P. 135—145.

24. *Haselbach W*. Acoustic emission of debonding between fibre and matrix to evaluate local adhesion // Composites Science and Technology. 2003. V. 63 (15). P. 2155—2162.

25. *Hamam Z.* et al. Acoustic Emission Signal Due to Fiber Break and Fiber Matrix Debonding in Model Composite: A Computational Study // Applied Sciences-Basel. 2021. V. 11 (18). P. 8406.

### ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ ЛЭМБА АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИН, ОСНОВАННОЙ НА ВЕЕРНОМ СКАНИРОВАНИИ

© 2022 г. Кай Луо<sup>1</sup>, Лян Чэнь<sup>1,\*</sup>, Вэй Лянь<sup>1</sup>, Хаобо Вен<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет электронных наук и технологий Китая, Ченду, 611731, КНР E-mail: \*chenliang72@uestc.edu.cn

## Поступила в редакцию 21.11.2021; после доработки 16.01.2022 Принята к публикации 21.01.2022

Методы неразрушающего контроля, основанные на распространении волн Лэмба, изучаются уже несколько лет. В данной работе для обнаружения дефектов алюминиевых пластин предлагается метод веерной сканирующей томографии и рассчитываются данные о дефектах алюминиевых пластин при обратном проецировании. Равномерно распределенное расположение датчиков используется на основе схемы сканирования и алгоритма веерно-лучевой томографии. Экспериментальным методом были обнаружены и проанализированы различные дефекты в алюминиевых пластинах. Получена величина характеристического времени, содержащая информацию о дефекте. Предлагается метод вейвлет-преобразования, основанный на методе разложения на эмпирические моды, для уменьшения шума в низкочастотных сигналах волн Лэмба и для восстановления изображений. Результаты показывают, что метод веерной волновой томографии Лэмба помогает обнаруживать дефекты алюминиевой пластины.

*Ключевые слова*: армированный углеродным волокном полимер, распознавание контуров, обратное проецирование с фильтрацией, морфологическая фильтрация, дефект расслоения.

**DOI:** 10.31857/S0130308222040042, **EDN:** BLGHAC

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающего контроль (НК) и диагностика являются основой обеспечения качества на производстве. Проверки качества необходимы на всех этапах проектирования, производства и обслуживания основных деталей и конструкций во многих отраслях, особенно в авиации [1—4]. Кроме того, по сравнению с традиционным методом, таким как визуальный контроль, при использовании методики НК, основанной на распространении волн Лэмба, можно обнаруживать дефекты внутри объекта, так как волны Лэмба обладают высокой чувствительностью к поверхностным и внутренним дефектам структуры. НК широко используются при разработке методов выявления дефектов в композиционных и металлических материалах, включая расслоения, отверстия и трещины [5—8]. Lin и Yuan [9, 10] проанализировали и экспериментально изучили распространение волн Лэмба в пластинах интегрированными пьезоэлектрическими (ПЭ) датчиками/актуаторами, пользуясь теорией пластин Миндлина. Они объединили ее с распространением волн Лэмба в материнских платах и исследовали влияние поперечного сдвига и момента инерции на материнских платах.

Для контроля дефектов в их эксперименте генерируется мода A0 волны Лэмба. Грондель объединил и улучшил связанный метод нормального разложения конечных элементов, чтобы успешнее производить контроль дефектов [11]. Волны Лэмба, особенно симметричная мода S0 и антисимметричная мода A0, широко используются в НК [12—14]. Однако традиционный метод использования волн Лэмба в неразрушающем контроле заключается в получении данных о форме волны для анализа информации о дефекте, и фактическое изображение внутреннего дефекта невозможно получить. В этой статье волна Лэмба в сочетании с веерным сканированием и алгоритмом обратного проецирования используется для выполнения томографической визуализации для восстановления изображения. Такой метод может получить изображение с полной информацией о дефектах, дающей лучший и более интуитивный результат.

Во многих приложениях, таких как бортовые системы предотвращения столкновений, разрешение в азимутальной плоскости более важно, чем разрешение в вертикальной плоскости. В этих случаях для быстрого сканирования целевой области веерный луч более эффективен, чем использование остронаправленного луча [15]. При реконструкции традиционные алгоритмы изображения чаще всего использует сканирование параллельными лучами и алгоритм обратного проецирования. Однако метод сканирования параллельными лучами имеет низкую скорость томографической визуализации и низкое качество восстановленных изображений. Используя метод сканирования веерным лучом под одинаковым углом, можно одновременно собирать несколько проекционных данных. Частота дискретизации метода веерного сканирования выше и точнее, чем метод скани-
рования с параллельным лучом. В данной статье разделе 2 описывается теория веерной волновой томографии Лэмба. В разделе 3 обсуждается эксперимент по веерной волновой томографии Лэмба, приводится анализ его осуществимости и предлагается использование метода вейвлетного шумоподавления. Данный метод основан на методе разложения на эмпирические моды (РЭМ), для уменьшения генерации шума и оптимизации сигнала. В разделе 4 анализируется качество восстановленного изображения и улучшение сигнала после вейвлет-преобразования, а в разделе 5 приводится заключение статьи.

# 2. МЕТОДЫ

## 2.1. Принцип веерного сканирования

Традиционные методы ультразвуковой визуализации в основном используют сканирующую томографию с параллельным или остронаправленным лучом, которая работает медленно и имеет низкое качество восстановления. По сравнению со сканированием с параллельным лучом секторное сканирование может собирать данные с нескольких проекций, которые имеют характеристики высокой скорости сканирования и высокой степени охвата. По различному расположению датчиков сканирование секторов можно разделить на два типа: равноудаленное (детекторов расположены на равном расстоянии друг от друга) и изометрическое (с одинаковым угловым интервалом). Схема равноудаленного сканирования может быть разделена на сканирование с однопролетным расстоянием между апертурами и сканирование с двухпролетным расстоянием между апертурами. Схема изометрического сканирования представлена круговым веерным сканированием. Предполагая, что общее количество датчиков равно 16, распределение лучей различных схем сканирования показано на рис. 1 *а*—*в*.

На рис. 1*а* и б показано сканирование структуры с одним перекрестным отверстием и двойным перекрестным отверстием, при этом очевидны артефакты данных, много дефектов данных, малая дальность покрытия и низкая эффективность использования датчиков.



Рис. 1. Распределение лучей на диаграммах сканирования:

*а* — структура с одним перекрестным отверстием; *б* — двойным перекрестным отверстием; *в* — диаграмма веерного сканирования.

Изометрическая веерная схема обычно используется на круглой участке. Датчики равномерно расположены по окружности контролируемого участка. Когда один из датчиков передает ультразвуковые сигналы через контролируемый участок, другие датчики принимают сигналы в направлении по часовой стрелке. Затем соседние датчики действуют как источник передачи акустического сигнала по часовой стрелке. Процесс сканирования повторяется до тех пор, пока все датчики не будут выступать в качестве источников передачи сигнала и сканирование по схеме веера не будет завершено. Как показано на рис. 1*в*, испускаемые лучи распределяются более равномерно, эффективная покрываемая площадь более общирна, а точность сканирования намного выше, чем у двух других методов. Согласно кривой дисперсии групповой скорости волн Лэмба, скорость волны зависит от толщины пластины. При встрече волны Лэмба с сильно отражающим дефектом распространение волны Лэмба проявляется как распространение в обход дефекта, что удлиняет путь распространения луча и увеличивает время пролета (ВП). Это эквивалентно уменьшению скорость распространения. Следовательно, проецируемое значение (данные ВП волны Лэмба) на спроецированном пути контролируемой области представляет собой линейный интеграл ее медленности (как обратная величина скорости распространения волны Лэмба v(s)) на спроецированном пути. Значение проекции p может быть описано как

$$p = \int_{s} \frac{1}{v(s)} ds. \tag{1}$$

Датчик расположен согласно описанной выше схеме сканирования веерным лучом. Расчет ВП секторного сканирования необходим для последующего восстановления изображения.

#### 2.2. Принцип ОПФ

Преобразование Радона — функция интегрального преобразования, которая проецирует двумерную плоскость из изображения вдоль направления в одномерное контурное изображение. Математически, как показано на рис. 2, это можно записать в виде:

$$R(f) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy,$$
<sup>(2)</sup>

где *t* обозначает  $x\cos\theta + y\sin\theta$ , что представляет собой линию проекции, а  $\theta$  — угол проекции.

Одним из алгоритмов, реализующих преобразование Радона, является метод обратного проецирования с фильтрацией (ОПФ) [16]. Было показано, что алгоритм ОПФ дает лучшие алгоритмы восстановления изображения даже при более коротком времени вычислений. Алгоритм восстанавливает изображения, оценивая целевые фрагменты изображения из набора проекций. Для двумерных объектов требуется теорема о центральном сечении, с помощью которой получают преобразование Фурье на прямой [17]. Простое восстановление возможно, если предполагается, что другие проекции равны нулю, а значения преобразования Фурье правильно интерполированы в двумерную область Фурье. Алгоритм ОПФ может быть выражен:

$$f(x,y) = \frac{\pi}{N} \sum_{i=1}^{N} \mathcal{Q}_{\theta_i}(x\cos\theta_i + y\sin\theta_i), \qquad (3)$$

где  $Q_{\theta_i}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i)$  получается из  $Q_{\theta}(\omega)$  (так называемой фильтрованной проекции), разностный угол  $Q_{\theta_i}(\omega)$  добавляется для оценки f(x, y), в то время как N и  $\theta_i$  являются данными проекции.



Рис. 2. Схема преобразования Радона.

# 3. ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ ВЕЕРНОЙ ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Базируясь на приведенном выше теоретическом анализе, осуществимость и эффективность волновой томографии Лэмба и вейвлет-преобразования основаны на методе РЭМ с использованием веерной диаграммы направленности.

В НК технология ультразвукового сканирования может обнаруживать дефекты, которые больше длины волны ультразвука. Чтобы исключить влияние модальной гибридизации на контроль, была выбрана симметричную моду (A0), которая идеально подходит для контроля. Метод вертикального нагружения может использоваться для возбуждения волн Лэмба моды A0 в низкочастотном диапазоне.

Экспериментальная установка на рис. 3 включает алюминиевую пластину, 64 ультразвуковых пьезодатчика, генератор сигналов, предусилитель, осциллограф, компьютер. Различные дефекты расположены в центре круговой области и на 1/3 радиуса от центра круга. Прямой датчик продольной волны возбуждает волны Лэмба в виде ультразвука в заданной точке. Прямой датчик продольной волны принимает данные о ВП волны Лэмба по часовой стрелке в других положениях. Шестьдесят четыре датчика по очереди возбуждают сигнал по часовой стрелке, а остальные 63 датчика принимают сигнал, проходящий через контролируемую круговую область.

В эксперименте контролируемым объектом является круглый алюминиевый лист радиусом 150 мм. Толщина алюминиевой пластины 2 мм. Плотность листа  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, модуль Юнга E = 70 ГПа, коэффициент Пуассона  $\sigma = 0.33$ .

На алюминиевых пластинах толщиной 2 мм создавались дефекты радиусом 5 мм и 10 мм. Также были дефекты радиусом 10 мм, которые располагались в верхнем правом углу пластины на расстоянии 1/3 радиуса самой пластины. Глубина дефектов составляла 1,5 мм. В эксперименте окружность с круглой областью контроля радиусом 150 мм была разделена на 64 равные части. Используется пьезоэлектрический керамический ультразвуковой датчик с центральной частотой 500 кГц и диаметром 1 см. Размах напряжения генератора сигнала установлен равным 10 В. Чтобы максимально полностью охватить круглую область для получения более четких изображений и уменьшения артефактов, для зонда выбрано 64 точки дискретизации. Расположение передающего датчика фиксировано и напрямую связано с генератором сигналов по схеме веерного луча. Приемный датчик перемещается и останавливается в направлении по часовой стрелке в соответствии со следующей позицией, отмеченной на экспериментальной платформе. Данные о антисимметричной модальной проекции волны Лэмба по 63 низкочастотным модам могут быть получены сканированием после того, как начнется передача сигналов. Средняя точка каждого объекта контроля — положение прямого датчика, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальная установка для волновой томографии Лэмба.

Точно так же передающий датчик был перемещен по часовой стрелке в соответствии со следующей позицией калибровки для сбора и хранения экспериментальных данных о ВП, в итоге было записано 63 × 64 группы сигналов ВП волн Лэмба.

После анализа сохраненных проекционных данных и шумоподавления сигнала извлекаются данные ВП волны Лэмба из антисимметричной моды A0 в низкочастотной моде. На основе одновременного итерационный метода восстановления изображение контролируемой круглой области восстанавливается с использованием экспериментальных проекционных данных и определяется соответствующая информация о дефекте.

Источником возбуждения датчика продольных волн является пятипериодный синусоидальный сигнал возбуждения с центральной частотой 300 кГц, модулированный окном Хеннинга.

Для работы с нестационарными и нелинейными многомодовыми сигналами ВП волн Лэмба предлагается схема фильтрации волн Лэмба, основанная на комбинации РЭМ и вейвлет-преобразования.

Метод РЭМ включает в себя ортогональность и отдельные внутренние компоненты, полученные после рекурсивного процесса [18]. Он раскладывает комплексный сигнал в соответствии с его временной областью и идентифицирует все внутренние колебательные моды в сложном движении. Huang и др. [18] считают, что любой сигнал состоит из различных эмпирических мод (ЭМ). Линейная или нелинейная модель экстремума и пересечения нуля в каждой точке одна и та же. Любое непрерывное пересечение имеет только один экстремум. Каждая схема должна быть независима от других.

Сложный сигнал может быть разложен на конечное число ЭМ с помощью преобразования РЭМ, и каждая компонента содержит характеристики исходного сигнала в разных временных масштабах. ЭМ должны удовлетворять двум условиям: во-первых, на всем временном интервале функции количество локальных экстремумов и точек пересечения нуля должно совпадать или, как максимум, отличаться на единицу. Во-вторых, локальные значения ЭМ симметричны и в среднем равны нулю [18—20].

Суть метода РЭМ заключается в разложении комплексного сигнала на конечное число ЭМ [20]. Компоненты ЭМ получаются принудительной стабилизацией сигнала. Подробные этапы РЭМ следующие.

Находятся все экстремумы функции сигнала x(t), а функция верхней огибающей получается с помощью функций сплайн-интерполяции  $e_{min}(t)$  и  $e_{max}(t)$ . Функция средней огибающей рассчитывается:

$$m(t) = (e_{\max}(t) + e_{\min}(t))/2.$$
(4)

Функция IMF(t) получается путем вычитания из исходного сигнала x(t) функции m(t). Если это вначале не получилось, требуется повторить шаги выше. Остаточная функция обозначается как R'(t), и вывод может быть выражен в уравнении:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{n} IMF_i(t) + R(t),$$
(5)

где  $IMF_i(t)$  — функция собственных колебаний, а R(t) — остаточная компонента. РЭМ-фильтр может эффективно отфильтровывать высокочастотный шум. Вейвлет-преобразование сопоставляет исходный сигнал с пространством функций вейвлета и раскладывает сигнал на две части: крупномасштабная аппроксимация и подробное представление. Часть крупномасштабной аппроксимации далее раскладывается в соответствии с определением, чтобы получить дополнительную крупномасштабную аппроксимацию и более точное детальное разрешение. Оптимальный восстановленный сигнал может быть получен путем выбора соответствующих требований к преобразование части. Вейвлет-преобразование [21—24] позволяет уменьшить степень автокорреляции сигнала, а затем разложенные вейвлет-коэффициенты обрабатываются пороговым анализом. Экспериментальный сигнал ВП низкочастотной многомодовой волны Лэмба ТОF показан на рис. 4.

Метод вейвлет-преобразования используется после удаления шума из низкочастотного многомодового сигнала Лэмба с помощью РЭМ. Функция вейвлета «db8» хорошо подходит для фильтрации импульсных ультразвуковых сигналов. Из рис. 5a видно, что в пятислойном вейвлет-разложении с использованием «db8» все еще присутствует небольшое количество низкочастотного шума, в то время как сигнал на рис. 56 с использованием шестислойного вейвлет-разложения является очень гладким. Поэтому для разложения шестислойного вейвлета используется вейвлет-функция «db8», а восстановление выбирается так, как показано на рис. 56.



Рис. 4. Сигнал ВП низкочастотных многомодовых волн Лэмба с шумом.

На рис. 5 показано, что компонент шума ЭМ удаляется после того, как РЭМ раскладывает и фильтрует сигнал ВП, чтобы получить сигнал без шума и в дальнейшем фильтровать другое соответствующее шумовое вейвлет-преобразование. Отфильтровывается небольшой резкий шум во фронте и перестройка на участке основного импульса. РЭМ и вейвлет-преобразование делают сигнал очень гладким и хорошо сохраняют модальные характеристики исходного сигнала. Это также приводит к меньшему количеству артефактов и неровностей после восстановления изображения, что делает изображение более точным и четким.



Рис. 5. Сигнал ВП шумоподавляется с помощью РЭМ и вейвлет-преобразования: восстановленная аппроксимация на уровне 5 (*a*); восстановленная аппроксимация на уровне 6 (б).

Модифицированный метод [17] используется для расчета значения ВП моды А0 волны Лэмба в бездефектной алюминиевой пластине и сравнения с теоретическим значением по дисперсионной кривой волны Лэмба [25]. Результаты показывают, что коэффициент ошибки определения ВП составляет всего 0,36 %.

Путем извлечения упомянутых выше данных ВП и визуализации с помощью алгоритма ОПФ можно получить карту дефектов соответствующей алюминиевой пластины, показанную на рис. 6 *а*—*в*.

в

б

а



Рис. 6. Изображения дефектов в разных положениях и размеров на алюминиевых пластинах: дефект 5 мм в центре алюминиевой пластины (*a*); дефект 10 мм в центре алюминиевой пластины (*б*); дефект 10 мм, смещенный от центра алюминиевой пластины (*в*).

# 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя метод РЭМ и вейвлет-преобразование для обработки сигнала, отправленного и полученного детектором, заметен эффект фильтрации высокочастотного шума, а низкая частота остается точной. Отфильтрованный сигнал является гладким и хорошо сохраняет модальные характеристики исходного сигнала. Описанный выше метод веерного сканирования используется для контроля дефектов алюминиевой пластины. Для опытов были выбраны дефекты радиусом 5 и 10 мм, которые располагались в центре пластины, и офсетные дефекты радиусом 10 мм, которые были смещены от центра пластины. На серых изображениях восстановленных изображений различных моделей дефектов в центре и в правом верхнем углу контролируемого круга имеется заметная белая пятнистая и небольшая круглая область, которая отличается от окружающего значения серой области и оценивается как дефект. Размеры дефектов восстановленных изображений различны, что соответствует модели центрального дефекта с радиусом 5 и 10 мм и модели смещенного от центра дефекта с радиусом 10 мм. По сравнению с экспериментальной моделью дефекты на восстановленных изображении имеют схожую форму, одинаковое расположение, они заметны, что позволяет хорошо восстанавливать модельные дефекты в эксперименте. Эксперименты доказывают, что веерно-лучевая волновая томография Лэмба может обеспечить лучший результат визуализации, и чем больше дефектов, тем четче результат визуализации.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковой метод НК металлической алюминиевой пластины исследуется методом веерных ультразвуковых волн Лэмба. Во-первых, кратко представлены метод веерного сканирования и принципы его работы. Затем экспериментальный метод используется для контроля технологии веернолучевой томографии Лэмба. Обнаружено, что метод возможно применять для контроля дефектов алюминиевой пластины. Извлечение сигнала методом РЭМ и вейвлетпреобразование делает сигнал более гладким, дает превосходный эффект фильтрации высокочастотного шума.

РЭМ и вейвлет-преобразование объединяются для обработки данных ВП, и сигнал сглаживается. Восстановленное изображение имеет высокое качество и содержит мало артефактов. Координаты и форма дефектов соответствовали экспериментальному положению и размеру точек дефекта. Таким образом, веерно-лучевая сканирующая томография может быть эффективно и точно применена для контроля дефектов алюминиевых пластин.

Данные, подтверждающие результаты исследования, можно получить у авторов по обоснованному запросу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Park E., Kim N., Kim S., Kwon D. Nondestructive wire fault diagnosis using resistance spectroscopy analysis // J. Mech. Sci. Technol. 2019. V. 33. P. 3649—3654.

2. *Bui H.K., Wasselynck G., Trichet D.* Application of Degenerated Hexahe-dral Whitney Elements in the Modeling of NDT Induction Thermography of Laminated CFRP Composite // IEEE Trans. Magnetics. 2016. V. 52 (3). P. 1–4.

3. *Hussein A., Albarody T., Alebrahim R.* Damage detection in glass/epoxy composite structure using 8–12 GHz X-band // J. Mech. Sci. Technol. 2020. V. 34. P. 1111–1117.

4. *Laroche N., Bourguignon S., Carcreff E.* An Inverse Approach for Ultrasonic Imaging From Full Matrix Capture Data: Application to Resolution Enhancement in NDT // IEEE Trans, Ferroelectrics. 2020. V. 67 (9). P. 1877—1887.

5. Suh M.W., Shim M.B., Kim M.Y. Crack identification using hybrid neuro-genetic technique // J. Sound and Vibration. 2000. V. 238 (4). P. 617-635.

6. Su Z., Ye L. Lamb wave-based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using artificial neural algorithm // J. Composite Structures. 2004. V. 66 (1). P. 627–637.

7. Kessler S.S., Spearing S.M., Soutis C. Damage detection in composite materials using Lamb wave methods // J. Smart Materials and Structures. 2002. V. 11. P. 269–278.

8. *Biemans C., Staszewski W.J., Boller C.* Crack detection in metallic structures using piezoceramic sensors // J. Key Engineering Materials. 1999. V. 12. P. 112—121.

9. *Lin X., Yuan F.G.* Diagnostic Lamb waves in an integrated piezoelectric sensor/actuator plate: analytical and experimental studies // J. Smart Materials and Structures. 2001. V. 10. P. 907—913.

10. *Lin X., Yuan F.G.* Detection of multiple damages by prestack reverse-time migration // J. AIAA. 2001. V. 39 (11). P. 2206–2224.

11. *Grondel S., Paget C., Delebarre C.* Design of optimal configuration for generating A Lamb mode in a composite plate using piezoceramic transducers // J. Acoustical Society of America. 2002. V. 112 (1). P. 84—90.

12. Song J., Kim S., Kim S. Lamb wave propagation on a unidirectional CFRP plate: comparison of FEM simulations, experiments, and analytical calculations // J. Mech. Sci. Technol. 2021. V. 35 (9). P. 3863—3869.

13. *Moallemi N., Shahbazpanahi S.* A Distributed Reflector Localization Approach to Ultra-sonic Array Imaging in Nondestructive Testing Applications // IEEE Trans. Signal Processing. 2014. V. 62 (15). P. 3863—3873.

14. *Rawashdeh Y., Kay S.* A New Physically Motivated Clutter Model With Applications to Nondestructive Ultrasonic Testing // IEEE Trans, Ultrasonics, Ferroelectrics. Frequency Control. 2020. V. 67 (8). P. 1679—1690.

15. Katare K.K., Chandravanshi S., Sharma A. Anisotropic Metasurface-Based Beam-Scanning Dual-Polarized Fan-Beam Integrated Antenna System // IEEE Trans. Antennas. Propagation. 2019. V. 67 (12). P. 7204—7215.

16. *Effendi M.R., Sekar Ningrum F.A., Amri N.A.* Interpolation Effect on FBP-Based Image Reconstruction of Measured L-Band Microwave Tomography // IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite. 2021. P. 290—293.

17. *Chen L., Xiao Q., Wei L.* A time of flight revising approach to improve the image quality of Lamb wave tomography for the detection of defects in composite panels // Eng. Compos. Mater. 2018. V. 25 (3). P. 587—592.

18. *Li S., Qin N., Huang D.* Damage Localization of Stacker's Track Based on EEMD-EMD and DBSCAN Cluster Algorithms // IEEE Trans, Instrum Meas. 2020. V. 69 (5). P. 1981—1992.

19. Singh S., Kumar N. Combined rotor fault diagnosis in rotating machinery using empirical mode decomposition // J. Mech. Sci. Technol. 2014. V. 28 (12). P. 4869-4876.

20. *Huang N.E., Shen Z., Long S.R.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1971. V. 454.1998. P. 903—995.

21. *Rinkevich A.B., Perov D.V.* A wavelet analysis of acoustic fields and signals in ultrasonic nondestructive testing // Russian Journal OF Nondestructive Testing. 2005. V. 41 (2). P. 93—101.

22. Perov D.V., Rinkevich A.B., Smorodinskii Ya.G. Wavelet Filtering of Signals from Ultrasonic Flaw Detector // Russian Journal OF Nondestructive Testing. 2002. V. 38 (12). P. 869–882.

23. *Chen L., Li X., Li X.B.* Signal extraction using ensemble empirical mode decomposition and sparsity in pipeline magnetic flux leakage nondestructive evaluation // Review of Scientific Instruments. 2009. V. 80 (2). P. 025105.

24. *Chen L., Li J.L., Zeng Y.K.* Magnetic Flux Leakage Image Enhancement using Bidimensional Empirical Mode Decomposition with Wavelet Transform Method in Oil Pipeline Nondestructive Evaluation // Journal of Magnetics. 2019. V. 24 (3). P. 423—428.

25. *He Y., Zhu Y.P., Tu X.T.* Dispersion curve analysis method for Lamb wave mode separation // Structural Health Monitoring-An International Journal. 2020. V. 19 (5). P. 1590—1601.

# ПРИМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭХОИМПУЛЬСА В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ОДНОРОДНОСТИ БЕТОНА

© 2022 г. М.А. Абреу Филью<sup>1,2,\*</sup>, К. Морено<sup>3</sup>, Е. Лусо<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт устойчивого развития и инноваций в области строительства, Гимарайнш, Португалия <sup>2</sup> Университет Минью, Гимарайнш, Португалия <sup>3</sup>Политехнический институт Браганса, Браганса, Португалия \*E-mail: marcoabreufilho@hotmail.com

> Поступила в редакцию 04.02.2022; после доработки 18.02.2022 Принята к публикации 18.02.2022

Ультразвуковой метод является одним из методов неразрушающего контроля, который наиболее технологически продвинулся за последние несколько лет. Это исследование направлено на проверку точности и возможностей этого метода при определении механических свойств бетонных элементов с использованием оборудования ультразвуковой томографии, основанного на использовании скорости эхоимпульса (S-волны). Модуль упругости и прочность бетона на сжатие оцениваются по скорости эхоимпульса. Кроме того, оценивается однородность бетонных элементов. Расчет прочность бетона на сжатие был произведен для кубических образцов, а достигнутая точность составила более 91 % с использованием аналитического подхода, предложенного в этой работе. Коэффициент корреляции между скоростью эхоимпульса и силой одноосного сжатия, обнаруженный в этом исследовании, составил более 97 %. Таким образом, оказалось эффективным использование ультразвукового метода НК для оценки однородности бетонных элементов.

Ключевые слова: методы НК; бетонные конструкции; ультразвуковой эхоимпульс, S-волны.

DOI: 10.31857/S0130308222040054, EDN: BLJAFZ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Бетон является одним из наиболее широко используемых строительных материалов в мире и представляет собой смесь цемента, воды и заполнителей, а современный бетон содержит все больше и больше минеральных компонентов, химических добавок, полимерных волокон и т.д. [1]. Бетон является конструкционным материалом, который может обладать характеристиками, способными изменяться в широком диапазоне, даже при использовании одинаковых параметров производства и одного и того же сырья [2]. Учитывая эту изменчивость, европейский стандарт EN 206-1 [3] устанавливает, что весь произведенный бетон должен подвергаться производственно-му контролю, дополнительно должна быть аттестована его прочность на сжатие.

Предполагается, что бетон достигает проектной прочности через 28 дней. Обычно изменение прочности контролируют с помощью разрушающих испытаний образцов, изготовленных из тех же партий бетона, которые использовались на строительной площадке. Однако результаты испытаний получены в контролируемых лабораторных условиях и могут не отражать реальные характеристики бетона при эксплуатации [4, 5].

Для оценки механических характеристик бетона по месту эксплуатации методы неразрушающего контроля (НК) представляют определенный интерес, поскольку они позволяют определять свойства материалов, оставаясь при этом быстрыми и недорогими [5]. Несмотря на то, что испытание керна из бетона стало наиболее эффективным методом прямой оценки прочности бетона на сжатие в процессе эксплуатации [6], в некоторых ситуациях этот метод не может быть рекомендован или даже невозможен [7, 8]. Кроме того, такой метод малоразрушающего контроля (МК) требует больше рабочего времени и нецелесообразно проводить пробоотбор на больших площадях [9]. С другой стороны, в последние годы технологии НК развиваются, их стоимость снижается, а интерес к ним растет [10]. Растущий интерес к НК также можно объяснить необходимостью оценки существующих сооружений [11]. Такая оценка требуется в различных ситуациях: (а) когда некоторые повреждения возникли спустя время; (б) когда необходимо учитывать новые требования из-за изменений выдерживаемых нагрузок; (в) когда состояние материала должны быть проверено вследствие возникающих подозрений [5].

Другим преимуществом, связанным с портативностью средств неразрушающего контроля, является тот факт, что увеличение количества измерений связано с минимальным увеличением стоимости испытаний [12]. Однако такие методы предоставляют информацию о тех физических свойствах, которые коррелируют с механическими свойствами, в отличие от разрушающих методов контроля, которые непосредственно определяют механические характеристики [11]. Из-за качества оценки, на которую могут повлиять некоторые погрешности, европейский стандарт EN 13791 [13] устанавливает, что методы НК должны быть откалиброваны по результатам испытаний керна из бетона.

Использование ультразвукового методов НК в последние годы получило значительное развитие, и, как большое преимущество, ультразвуковой контроль выполняется с помощью портативного оборудования. Он используется *in-situ* непосредственно на самом сооружении, не вызывая никаких повреждений конструкции, что делает его важным инструментом для улучшения контроля качества и помощи в определении характеристик и диагностике существующих сооружений.

С помощью обычного ультразвукового оборудование (ОУО) определяется скорость, с которой продольная волна (Р-волна) проходит через бетон. Процедура измерения этой скорости установлена европейским стандартом EN 12504-4 [14]. По скорости ультразвука можно: (а) оценить динамический модуль упругости; (б) определить однородность бетонного элемента или деталей, изготовленных из одной и той же партии бетона; (в) следить за внутренними изменениями свойств с течением времени; (г) оценивать контроль качества; (д) оценивать глубину трещин [14].

Данная работа направлена на проверку точности и возможностей метода контроля для оценки механических свойств бетонных элементов с использованием современного ультразвукового томографического оборудования (УТО), которое определяет скорость импульса поперечных волн (S-волна), в отличие от традиционного оборудования. Ожидается, что УТО может предоставить более репрезентативные данные по сравнению с ОУО.

# 2. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Первые работы, посвященные возбуждаемым механическим импульсам в бетоне, датируются серединой 40-х гг. ХХ века. Главный вывод, который следовал из тех исследований, это то, что скорость ультразвукового импульса в твердом материале зависит, в первую очередь, от упругих свойств, позволяющих напрямую оценивать механические свойства бетона, а именно: его прочность на сжатие.

Ультразвуковой контроль проводился с использованием прибора, реализуемого под названием PUNDIT [12] (аббр. от Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester — портативный ультразвуковой дефектоскоп с цифровой индикацией). Традиционное оборудование для испытания ультразвуковыми волнами (рис. 1) измеряет скорость Р-волн [12, 16].



Рис.1. Традиционное оборудование для испытания ультразвуковыми волнами.

Основное применение ультразвукового метода неразрушающего контроля — возможность оценки модуля упругости бетона.

Такая оценка проводится с применением скорости импульса ультразвуковой Р-волны по уравнению [17]:

$$E_d = \frac{V^2 \cdot \rho}{K},\tag{1}$$

где  $E_d$  — динамический модуль упругости, Па; V — это скорость продольной волны (Р-волны), м/с;  $\rho$  — плотность бетона, кг/м<sup>3</sup>; K — константа, зависящая от коэффициента Пуассона v, согласно уравнению:

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)}.$$
 (2)

В представленной работе использовалось оборудование PL-200PE от Proceq, УТО (рис. 2) измеряет скорость S-волн. S-волны имеют преимущество перед P-волнами в плане большей статической устойчивости [18].



Рис. 2. УТО.

Принцип работы основан на измерении времени прохождения ультразвукового импульса в твердом теле и получении соответствующего эха. Каждый из девяти датчиков на левой стороне рукоятки, как показано на рис. 2, соединен с соответствующим датчиком справа. Излучатели импульсов, расположенные слева, постоянно излучают ультразвуковые импульсы, а приемники импульсов, расположенные справа, принимают соответствующие эхосигналы, как показано на рис. 3 [19, 20].

Скорость импульса, измеряемая с помощью УТО, определяется при отдельной расшифровке сигналов девяти пар преобразователей. Используя данное оборудование, результаты контроля в каждом отдельном измерении будут более репрезентативными, чем результаты при использовании традиционного оборудования, которое имеет только по одному излучающему и принимающему преобразователю, а измеряемая скорость импульса определяется только в одном направлении.

Первым шагом в данном исследовании было обеспечение аналитической оценки прочности бетона по скорости импульса, определяемой УТО (S-волны), как это возможно и с использованием P-волн.

Так как механизмы распространения Р-волн и S-волн различны, то их скорость в бетоне тоже различна. Scott [21] отмечает, что скорость S-волн составляет примерно 60 % от скорости P-волн.



Рис. 3. Принцип работы УТО.

Подобное соотношение между скоростями S-волн и P-волн обнаружено в исследованиях, проводимых Birgul [22] и Lee и Oh [23].

Внутренняя влага бетона оказывает влияние на скорость P-волн, Bungey [15] отмечает, что скорость увеличивает примерно на 5 % по сравнению с сухим бетоном, при этом S-волны не проходят через газообразные и жидкие среды, что означает, что внутренняя влажность не влияет на их скорость [24].

Другие факторы влияют на скорость импульса обоих типов волн. Ravibdraraja [25] и Evelry и Ibrahim [26] подтвердили в своих исследованиях, что тип бетона влияет на скорость импульса, Elvery и Ibrahim [26] даже подтвердили, что это влияние становится все большим в первые годы, что может негативно сказаться на точности установления взаимосвязи между скоростью ультразвука и прочностью бетона. Evangelista [27] в своей работе сделала вывод о том, что тип цемента может изменять скрость импульса приблизительно на 5 %.

Lee и Lee [28] в своих работах сделали вывод, что наличие крупного заполнителя значительно влияет на скорость импульса в бетоне в ранние годы, обнаружено, что скорость импульсов на 16 % выше в бетоне по сравнению с раствором. Однако Silva и др. [18] в своих исследованиях показали, что количество крупного заполнителя не имеет значительного влияния на скорость импульса.

Температура (если находится в пределах диапазона требований к эксплуатации) и уровень напряжений (кроме ситуаций чрезмерного напряжения) являются переменными, которые не влияют существенным образом на скорости импульсов [15, 26].

Чтобы преодолеть факторы, влияющие на скорость импульса, и сделать возможным использование S-волн для оценки прочности бетона, данное исследование нацелено на поиск альтернативы уравнения (1), в котором переменная V должна изменяться так, как показано в уравнениях (3) и (4). Уравнение (3) подходит для бетона возрастом между 3 и 28 днями, а уравнение (4) — для бетона возрастом более 28 дней:

$$V = 1,65 \cdot V_{\text{echo}} \cdot \exp(0,48 \cdot s \cdot j^{-0,1});$$
(3)

$$V = 1,65 \cdot V_{\text{echo}} \cdot \exp(0,3439 \cdot s),$$
(4)

где V — скорость сжатия импульса (Р-волны);  $V_{echo}$  — скорость эхоимпульса, измеренная посредством УТО (S-волны), м/с; *s* — коэффициент, который зависит от типа цемента, как показано в табл. 1; *j* — возраст бетона, сутки.

Предлагаемый аналитический метод позволяет оценивать динамический модуль упругости бетона, используя скорость эхоимпульса (S-волны) посредством УТО, с применением модифицированного уравнения (1). Динамический модуль упругости  $E_d$ , который оценивается по скорости

Таблица 1

Значения *s* согласно типу цемента

S	Тип цемента
0,20	CEM 42,5R, CEM 52,5 N, CEM 52,5R (класс R)
0,25	СЕМ 32,5 R, СЕМ 42,5 N (класс N)
0,38	СЕМ 32,5 N (класс S)

Источник: адаптировано из EN-1992 [29].

импульса ультразвука, эквивалентен тангенциальному модулю упругости  $E_c$  [30]. Согласно EN 1992 [29], по тангенциальному модулю упругости возможно рассчитать секущий модуль упругости бетона  $E_{cm}$ , используя уравенение:

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}.\tag{5}$$

По секущему модулю упругости напряжение сжатия может быть рассчитано с использованием уравнения, взятого из EN-1992 [29]:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{0.3}.$$
 (6)

где  $E_{cm}$  — величина модуля упругости, ГПа;  $f_{ck}$  — характеристическая прочность на сжатие цилиндра бетона.

# 3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Чтобы подтвердить эффективность оборудования и что предложенный аналитический метод позволяет использовать уравнение (1) с S-волнами, соответствующей процедурой является оценка результатов, полученных УТО в лабораторных условиях. Таким образом, цель программы эксперимента, представленного здесь, направлена на контроль образцов из обычной бетонной смеси цемента, воды и обычных заполнителей.

#### 3.1. Подготовка образцов

Материалом для создания тестовых образцов был известняковый портландцемент компании Secil, состав которого согласно EN 197-1 [31]: СЕМ II B/L-32.5, гранитный гравий 8/14, природный песок 0/4 и вода.

Для эксперимента в лаборатории Политехнического института Браганса были произведены 18 кубических образца бетона размерами 15×15×15 см и 3 образца в виде призм 15×15×55 см. Были изготовлены 3 различные смеси и обозначены как М1, М2 и М3. Пропорции песка, гравия, воды по отношению к массе цемента, используемые в каждой смеси, показаны в табл. 2.

Таблица 2

Пропорции	Цемент	Песок	Гравий	Вода
M1	1	1,28	2,28	0,40
M2	1	1,95	2,95	0,50
M3	1	1,28	2,28	0,55

Пропорции для изготовления бетонных смесей

Вязкость смесей определялась с помощью испытания на расплыв. Все бетонные смеси имели консистенцию класса S1, согласно стандарту standard EN 12350-2 [32]. Были изготовлены 6 кубических образцов, пронумерованные от 1 до 6, для каждой бетонной смеси. Кубический образец

бетона 1, сделанный из смеси М1, обозначался как C1—M1, а другие обозначались как (Cn—M1, Cn—M2 и Cn—M3 при n = 6), следуя такой же логике.

Из трех произведенных призм две были сделаны из бетонной смеси M2 (обозначались как P1—M2 и P2—M2) и одна — из смеси M1 (P1—M1)

Кубические образцы (С*n*—M1, С*n*—M2 и С*n*—M3) отвердевали после извлечения из формы при температуре T = 20 °С и относительной влажности 90 %. После 28 дней процесса отверждения были проведены испытания на одноосное сжатие с контролем нагрузки в машине для испытаний на сжатие от Matest.

Образцы в виде призм (P1—M1, P1—M2 и P2—M2) также находились в процессе отвердевания при температуре T = 20 °C и относительной влажности 90 % в течение 28 дней. После этого еще 62 дня они находились в условиях лабораторной атмосферы. Для этих образцов возрастом 90 дней проводились испытания на сжатие и ультразвуковой контроль.

Для проведения механических испытаний данных призм потребовалось разрезать их на три равных кубических образца размерами 15×15×15 см (оставшаяся часть 15×15×10 см в последующих экспериментах не использовалась). Измерения с помощью ультразвукового оборудования проводились до и после разрезания призматических образцов.

### 3.2. Методика испытаний

Сначала кубические образцы (Сn—М1, Сn—М2 и Сn—М3) контролировали УТО и измеряли  $V_{\rm echo}$ . Полученные результаты использовали для аналитической оценки модуля упругости и прочности на сжатие бетона.  $V_{\rm echo}$  определяли в трех местах каждого образца: сверху, снизу и по центру (рис. 4). Измерения проводили, когда возраст бетона составлял 3, 7, 14, 21 и 28 дней.



Рис. 4. Положение датчика УТО при измерениях на кубических образцах.

Призматические образцы (P1—M1, P1—M2 и P2—M2) контролировали в возрасте 90 дней. Три измерения проделывали с целью получить представление об их однородности. Положение точек измерений было в центре между последующими разрезами (рис. 5).



Рис. 5. Положение датчика для измерения скорости импульса на призматических образцах для проверки однородности, предусматривая будущие разрезы.

Для частей призматических образцов (P1—M1.n, P1—M2.n и P2—M2.n при n = 3) определялась скорость ультразвукового импульса, чтобы оценить модуль упругости и прочность на сжатие более точно для каждого сегмента.

# 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

## 4.1. Кубические образцы

Результаты измерения скорости импульса использовали для оценки модуля упругости и прочности на сжатие образцов. Во-первых, применяли уравнение (3) и полученные результаты в виде переменной V подставляли в уравнение (1). Расчетный динамический модуль упругости делился на 1,05, чтобы получить секущий модуль упругости для каждого образца. Нормативная прочность на сжатие  $f_{ck}$  рассчитывалась для каждого образца с использованием уравнения (6) согласно EN-1992 [29].

Нормативную прочность на сжатие кубического образца  $f_{ck,cube}$  рассчитывали, используя численную интерполяцию из табл. 3.1 EN-1992 [29], как показано в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
$f_{ck}$ , МПа	12	16	20	25	30	35	40	45
$f_{\it ck, cube}$ , МПа	15	20	25	30	37	45	50	55

Раздел таблицы 3.1 из EN-1992 [29]

Таблица 4

Модуль упругости и прочность на сжатие кубических образцов, оцениваемых по скорости импульса ультразвука, прочности на сжатие, полученной при разрушающем контроле, и соответствующие погрешности

Образец	$V_{ m echo}$ , м/с	<i>Е<sub>ст</sub></i> , ГПа	$f_{ck}$ (АМ), МПа	$f_{ck,cube}$ (АМ), МПа	<i>f<sub>ck,cube</sub></i> (РК), МПа	Погрешность, %
C1—M1	2139	33,3	31,7	39,8	38,0	4,63
C2—M1	2098	32,0	26,9	32,7	34,8	-6,12
C3—M1	2116	32,6	29,0	35,6	35,5	0,19
C4—M1	2116	32,6	29,0	35,6	35,7	-0,24
C5—M1	2083	31,6	25,3	30,4	31,7	-4,10
C6—M1	2083	31,6	25,3	30,4	31,1	-2,25
C1—M2	2055	30,7	22,4	28,0	27,5	1,81
C2—M2	2055	30,7	22,4	28,0	27,8	0,72
C3—M2	2069	31,1	23,8	29,8	28,1	6,05
C4—M2	2083	31,6	25,3	30,4	29,0	4,83
C5—M2	2028	29,9	19,9	24,8	25,6	-2,85
C6—M2	2055	30,7	22,4	28,0	28,2	-0,71
C1—M3	2013	29,5	18,5	23,1	22,9	0,87
C2—M3	2055	30,7	22,4	28,0	25,7	8,95
C3—M3	2041	30,3	21,1	26,4	24,3	8,64
C4—M3	2041	30,3	21,1	26,4	24,6	7,32
C5—M3	2027	29,9	19,8	24,7	23,3	6,17
C6—M3	2000	29,1	17,4	21,7	22,0	-1,28

В табл. 4 представлены результаты расчета секущего модуля упругости  $E_{cm}$ , прочностей на сжатие  $f_{ck}$  и  $f_{ck,cube}$  аналитическим методом (AM) через скорость импульса ультразвука и прочность на сжатие  $f_{ck,cube}$ , полученной разрушающими методами контроля (PK).



Скорость эхоимпульса ультразвука, м/с

Рис. 6. Линейная аппроксимация.

Табл. 4 показывает, что оценка прочности на сжатие по скорости импульса ультразвука имеет погрешность в диапазоне от -4,40 до 8,95 %. Используя измеренную с помощью УТО  $V_{echo}$  (S-волны) и прочность на сжатие, полученную при РК, была проделана линейная аппроксимация между двумя полученных величинами, как показано на рис. 6.

График показывает, что возможно установить коэффициент корреляции между скорость эхоимпульса ультразвука и прочностью на сжатие бетона выше 97 % с доверительной вероятностью выше 94 % при линейной аппроксимации.

Рис. 7 и 9 показывают сравнение между: (а) кривая изменения прочности, рассчитанная аналитически, используя измерения скорости ультразвукового импульса при возрасте бетона 3, 7, 14, 21, 28 дней; (б) обратный анализ по результатам РК, используя уравнение 7 из Eurocode 2 [29]:

$$f_{ck}(t) = \left(\beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}\right) - 8,\tag{7}$$

где  $f_{ck}(t)$  — нормативная прочность на сжатие для возраста бетона t, МПа;  $f_{cm}$  — нормативная прочность на сжатие, полученная разрушающим методом, а  $\beta_{cc}(t)$  рассчитывают по уравнению:

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right\},\tag{8}$$

где *t* — возраст бетона, дни; *s* — коэффициент, который зависит от типа цемента, как показано в табл. 1.

Из рис. 7—9 можно увидеть, что кривая изменения прочности на сжатие, рассчитанная аналитически по скоростям импульса ультразвука, показала схожее поведение с результатами обратного анализа, проводимого по результатам разрушающего контроля. Большинство образцов показали почти постоянную погрешность при старении бетона до 28 дней.

#### 4.2. Призматические образцы

Первым испытанием, проводимым на призматических образцах, была проверка однородности до их разрезания. Были проведены три измерения скорости эхоимпульса в центральной части между разрезами в призматическом блоке, как показано на рис. 5. На рис. 10 показаны результаты, полученные для трех образцов в схематическом и графическом представлении.



Рис. 7. Кривые изменения прочности на сжатие, обратный анализ и аналитический метод для образцов, произведенных из бетонной смеси М1.



Рис. 8. Кривые изменения прочности на сжатие, обратный анализ и аналитический метод для образцов, произведенных из бетонной смеси М2.

Результаты, показанные на рис. 10, приводят к заключению, что призма P1—M2 имеет хорошую однородность, призма P1—M1 имеет среднюю однородность, а призма P2—M2 имеет низкую однородность.

После контроля однородности призматические образцы разрезались на три части размерами 15×15×15 см, а оставшаяся часть 10×15×15 см выбрасывается. Вновь проводилось измерение эхоимпульса ультразвука (на этот раз в соответствии с рис. 4) в каждой из трех частей призм. Части призм пронумерованы слева направо; выброшенная часть располагалась в крайнем левом углу.

В табл. 5 представлены результаты контроля УТО после разрезания призматических образцов. В табл. 5 также показаны  $V_{echo}$ ; секущий модуль упругости, рассчитанный по уравнению (1) (результат которого делится на 1,05), где переменная V заменялась результатом расчета по уравне-



Рис. 9. Кривые изменения прочности на сжатие, обратный анализ и аналитический метод для образцов, произведенных из бетонной смеси М3.



Рис. 10. Схематическое и графическое представление испытания на однородность с использованием УТО.

нию (4); прочность на сжатие, рассчитанная по уравнению (6) из EN-1992 [29]; прочность на сжатие, полученная при разрушающем контроле, а также соответствующие погрешности. Испытания проводились в возрасте 90 дней.

Оценка прочности на сжатие частей призм с помощью ультразвукового контроля и прочности на сжатие при разрушающем контроле имела погрешности в диапазоне от -7,80 до 3,39 %, что показывает хорошую точность. Только в двух частях (P1—M1.3 и P2—M2.2) измеренная скорость эхоимпульса изменялась после того, как образцы были нарезаны. Следовательно, согласно гипотезе, выдвинутой после первой проверки однородности, возможно подтвердить разрушающим методом, что призма P1—M2 была образцом с хорошей однородностью, призма P1—M1 имела среднюю однородность, а призма P2—M2 имела низкую однородность.

#### Таблица 5

Образец	<i>V</i> <sub>echo</sub> , м/с	<i>Е<sub>ст</sub></i> , ГПа	$f_{ck}$ (АМ), МПа	$f_{ck,cube}$ (АМ), МПа	$f_{ck,cube}$ (РК), МПа	Погрешность, %
P1-M1.1	2139	33,3	31,7	39,8	39,5	0,74
P1—M1.2	2158	33,9	34,1	43,6	42,2	3,39
P1—M1.3	2116	32,6	29,0	35,6	36,3	-2,02
P1—M2.1	2041	30,3	21,1	25,5	26,7	-4,49
P1-M2.2	2055	30,7	22,4	27,2	27,4	-0,73
P1—M2.3	2055	30,7	22,4	27,2	27,3	-0,37
P2—M2.1	2027	29,9	19,8	24,7	25,2	-2,14
P2—M2.2	2013	29,5	18,5	23,1	23,2	-0,33
P2—M2.3	2083	31,6	25,3	30,4	33,0	-7,80
P1—M1.1	2139	33,3	31,7	39,8	39,5	0,74
P1—M1.2	2158	33,9	34,1	43,6	42,2	3,39
P2—M2.3	2083	31,6	25,3	30,4	33,0	-7,80

Прочность на сжатие частей призматических образцов, оцениваемая по скорости эхоимпульса ультразвука, прочность на сжатие по результатам разрушающего контроля и соответствующие погрешности

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование дало возможность понять потенциал современного УТО для определения механических свойств бетона. Оборудование, которое использовалось в эксперименте, работает с поперечными волнами (S-волны), что отличается от ОУО, которое обычно измеряет продольные волны (Р-волны). В результате проведения данной работы могут быть построены следующие выводы:

с помощью аналитического метода, предложенного в данном исследовании, путем модификации уравнения (1), позволяющего использовать скорости импульсов S-волн для оценки динамического модуля упругости, можно было достичь точности более 91 % в прогнозировании прочности бетона на сжатие;

скорость эхоимпульса ( $V_{\rm echo}$ ) показала сильную линейную корреляцию с прочностью на сжатие, был достигнут коэффициент корреляции выше 97 % с доверительной вероятностью выше 94 %;

оценка однородности бетона оказалась возможной и точной. Измерения до и после разрезания призмы совпадали, только две части (из девяти) показали изменения скорости ультразвуковых импульсов. Тем не менее эти изменения составили менее 1 %;

аналитический метод пригоден, даже если пользователь не имеет информации о типе цемента, среднее значение *s* из табл. 1 может быть использовано в уравнениях (3) и (4). Однако это уменьшает точность прогнозирования прочности на сжатие на 8 %;

ультразвуковой метод НК оказался интересным для мониторинга изменения прочности на сжатие бетона:

соотношение вод и цемента не влияет на доверительную вероятность установления корреляции между скоростью ультразвуковых импульсов и прочности на сжатие бетона.

Проведение экспериментов с ультразвуковым оборудованием показало, что, когда он выполняется тщательно и систематически, такой метод является очень практичным методом НК. Однако важно указать, что УТО имеет высокую чувствительность, результаты меняются при незначительном изменении давления, прикладываемого к преобразователям. Для получения надежных результатов требуется компетентный пользователь, обученный работе с таким устройством.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aitcin P.C. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow // Cement and Concrete Research.

Attein P.C. Cements of yesterday and today. concrete of tomorrow // cement and concrete research.
 2000. V. 30 (9). P. 1349—1359.
 *2. Krause M., Bärmann M., Frielinghaus R., Kretzschmar F., Kroggel O., Langenberg K.J., Maierhofer C., Müller W., Neisecke J., Shickert M., Shmitz V., Wiggenhauser H., Wollbold F.* Comparison of pulse-echo methods for testing concrete // NTD&E International. 1997. V. 30 (4). P. 195—204.

3. CEN — European Committee for Standardization / Concrete — Part 1: Specification, performance, production and conformity. Brussels: EN 206-1, 2000.

4. *Telisak T., Carraquilho, Fowler D.W.R.* Early age strenght of concrete: a comparison of several nondestructive teste methods. Texas: Center for Transportation Research, 1991.

5. *Shah S.P., Subramaniam K.V.* Use of nondestructive ultrasonic techniques for material assessment and in-service monitoring of concrete structures // NDTnet. 2000. V. 5.

6. *Vona M., Nigro D.* Evaluation of the predictive ability of the in situ concrete strength through core drilling and its effects on the capacity of the RC columns // Materials and Structures. 2015. No. 48. P. 1043—1059.

7. Schabowicz K., Suvorov V.A. Nondestructive testing of a bottom surface and construction of its profile by ultrasonic tomography // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 2. P. 109–119.

8. *Brigante M., Sumbatyan M.A.* Acoustic methods for the nondestructive testing of concrete: a review of roreign publications in the experimental field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. No. 2. P. 100–111.

9. *Oh T., Kee S.H., Arndt R.W., Popovics J.S., Zhu J.* Comparison of NDT methods for assessment of a concrete bridge deck // Journal of Engineering Mechanics. 2013. V. 139 (3). P. 305—314.

10. Alani A.M., Aboutalebi M., Kilic G. Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges // NDT&E International. 2014. V. 61. P. 80—94.

11. *Breysse D*. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods // Construction and Building Materials. 2012. V. 33. P. 139—163.

12. Gomez-Heras M., Benavente D., Pla C., Martinez-Martinez J., Fort R., Brotons V. Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements // Construction and Building Materials. 2020. V. 261.

13. CEN — European Committee fo Standardization / Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. Brussels: EN 13791, 2019.

14. CEN — European Committee for Standardization / Testing concrete in structures. Part 4. Determination of ultrasonic pulse. Brussels: EN 12504-4, 2004.

15. *Bungey J.H., Millard S.G., Grantham M.G.* Testing of Concrete in Structures / 4<sup>a</sup> ed. Nova York: Taylor & Francis, 2006.

16. *Lim M.K., Cao H.* Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness // Construction and Building Materials. 2013. V. 38. P. 1310–1315.

17. Komlos K., Popovics S., Nürnbergerová T., Babál B., Popovics J.S. Ultrasonic pulse velocity test of Concrete properties as specified in various standards // Cement and Concrete Composites. 1996. 10 Junho. V. 18.

18. Silva F.A.N., Nogueira C.L., Silva J.A., Araújo A.V.P., Azevedo A.C., Delgado J.M.P.Q. Ultrasonic assessment of damage in concrete under compressive and thermal loading using longitudinal and transverse waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. P. 808—816.

19. Proceq S.A. Pundit manual. Schwerzenbach: Swiss Solutions, 2017.

20. International Atomic Energy Agency, Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Vienna: IAEA, 2002.

21. Scott D.B. Internal inspection of reinforced concrete for nuclear structures using shear wave tomography // Energy Conversion and Management. 2013. V. 74. P. 582—586.

22. *Birgül R*. Hilbert transformation of waveforms to determine shear wave velocity in concrete // Cement and Concrete Research. 2009. V. 39. P. 696—700.

23. Lee Y.H., Oh T. The measurement of P-, S-, and R-Wave velocities to evaluate the condition of reinforced and prestressed concrete slabs // Advances in Materials Science and Engineering. 2016.

24. Sabbağ N., Uyanık O. Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities // Journal of Applied Geophysics. 2017. V. 141. P. 13–23.

25. *Ravindrarajah R.S.* Evaluation of compressive strength for high-strength concrete by pulse velocity method. Proceedings of sessions sponsored by the Engineering Mechanics Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the Structures Congress San Antonio. Texas, 1992. P. 115–126.

26. *Elvery R.H., Ibrahim L.A.M.* Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages // Magazine of Concrete Research. 1976. V. 28. P. 181—190.

27. *Evangelista A.C.J.* Evaluation of concrete strength using different non-destructive testing methods (Translated from the portuguese — Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos), Rio de Janeiro: Dissertation (Doctorate in Civil Engineering) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

28. *Lee T., Lee J.* Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age // Construction and Building Materials. V. 252.

29. European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures. Brussels: EN 1992-1-1, 2010.

30. *Maia P.C. d. A., Waked L.V., Prellwitz M.F.* Estimate of Elastic Modulus of Continuous Flight Auger Concrete // Geotecnia Novembro. 2019. P. 27-40.

31. CEN — European Committee fo Standardization / Cement — Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: EN 197-1, 2011.

32. CEN — European Committee fo Standardization / Testing fresh concrete — Part 2: Slump test. Brussels: EN 12350-2, 2019.

УДК 620.179.13

### ТЕПЛОВОЙ СКАНЕР-ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## © 2022 г. А.О. Чулков<sup>1\*</sup>, В.П. Вавилов<sup>1</sup>, Д.А. Нестерук<sup>1</sup>, Б.И. Шагдыров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30 \*E-mail: chulkovao@tpu.ru

> Поступила в редакцию 28.02.2022; после доработки 15.03.2022 Принято к публикации 25.03.2022

Разработан самоходный тепловой дефектоскоп для контроля плоских крупногабаритных изделий методом тепловизионного сканирования, обеспечивающего более высокую эффективность и производительность испытаний по сравнению с классической схемой теплового контроля по отдельным зонам. Дефектоскоп предназначен для обнаружения расслоений, ударных повреждений и инородных включений в композиционных материалах и может использоваться для контроля коррозии в металлических оболочках, обеспечивая непрерывный контроль с производительностью до 20 м<sup>2</sup>/ч.

*Ключевые слова:* самоходный тепловой дефектоскоп, тепловой неразрушающий контроль, инфракрасная термография, сканирование, композиционный материал, крупногабаритное изделие, дефект, расслоение.

DOI: 10.31857/S0130308222040066, EDN: BLKSSL

#### введение

В России за последнюю декаду произошел существенный рост интереса к активному тепловому неразрушающему контроля со стороны высокотехнологичных предприятий. В первую очередь, это связано с объективными преимуществами теплового контроля (ТК), например, при испытаниях композиционных материалов: 1) метод является безопасным и бесконтактным (для нагрева традиционно используют оптические источники стимуляции – галогенные и ксеноновые лампы) [1-3]; 2) испытания могут быть реализованы как в односторонней (источники нагрева и тепловизор расположены с одной стороны от контролируемой поверхности), так и в двухсторонней процедурах ТК [4—6]; 3) результаты контроля, представляющие собой набор термограмм (количество которых может достигать нескольких тысяч), хорошо воспринимаются операторами, а температурные аномалии в зонах дефектов сравнительно легко идентифицируются; 4) производительность ТК при испытаниях по зонам достигает 4 м<sup>2</sup>/ч при размерах зоны одновременного контроля около 1 м<sup>2</sup>, а при реализации способа тепловизионного сканирования производительность ТК может достигать 25 м<sup>2</sup>/ч; 5) метод наиболее эффективен для обнаружения приповерхностных дефектов (оптимальный диапазон глубин выявляемых дефектов в композитах в односторонней процедуре составляет от 0 до 4 мм). Факт наилучшей чувствительности ТК к приповерхностным дефектам говорит о целесообразности комбинирования ТК с ультразвуковым (УЗ) методом контроля, для которого глубина «мертвой» зоны при контроле композиционных материалов находится в диапазоне от 0 до 1 мм.

В последние годы в Томском политехническом университете разработан ряд тепловых дефектоскопов, в том числе устройство для классического одностороннего ТК фюзеляжей цельнокомпозитных самолетов, устройство для контроля конусовидных изделий из композитов, роботизированная система для контроля теплозащитных покрытий крупногабаритных цилиндрических изделий, а также роботизированная система, осуществляющая неразрушающие испытания композиционных изделий сложной формы путем комбинирования классического одностороннего ТК и метода у.з. инфракрасной термографии (УИТ) [7].

Комбинирование различных устройств нагрева, а именно: оптических (на базе галогенных или ксеноновых ламп) и ультразвуковых (на базе магнитострикционных или пьезоэлектрических преобразователей), в одной процедуре испытаний представляет новое направление в ТК. Данный подход позволяет выявить больше скрытых дефектов по сравнению с реализацией каждого метода в отдельности. Например, оптический нагрев эффективен для обнаружения расслоений, а УЗ нагрев — для обнаружения закрытых («слипнутых») трещин. Для комбинированного ТК разработаны программные алгоритмы, которые «сшивают» термограммы при испытаниях крупногабаритных изделий и позволяют проводить обработку результатов испытаний с использованием нейронных сетей (HC) с целью автоматизированного обнаружения и классификации дефектов [7].

В соответствии с тенденцией к роботизации неразрушающих испытаний, а также благодаря использованию широкоформатных ИК тепловизоров, в ТК возрос интерес к устройствам тепловизионного сканирования, в основе которых лежат способы точечного/линейного сканирования, разрабатывавшиеся еще в СССР [8, 9]. Отличие современного способа тепловизионного сканирования от более ранних заключается в регистрации температуры контролируемой поверхности в пределах полного кадра тепловизора, а не в отдельных точках или строках [10—12]. Полученные при тепловизионном сканировании последовательности полноформатных термограмм реконструируют в изображения, соответствующие определенному времени контроля (методика реконструкции описана в [13]). Кроме того, рост интереса к устройствам тепловизионного сканирования связан с внедрением НС в качестве инструмента дефектоскопии и дефектометрии [14—18].

Использование роботизированной техники обеспечивает высокую повторяемость и производительность испытаний, позволяет унифицировать результаты контроля однотипных изделий и применять автоматизированные алгоритмы для их обработки. Такие алгоритмы, основанные на комбинировании формул инверсии и HC, улучшают повторяемость результатов контроля и повышают производительность обработки данных по сравнению с «ручными» процедурами. Следует отметить, что применение алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии, ориентированных на применение HC, требуют строгого соответствия параметров контролируемых материалов, а также условий проведения контроля, тем параметрам и условиям, при которых были получены данные, использованные для обучения HC [14—18].

При испытаниях крупногабаритных композиционных изделий новым подходом в ТК является применение самоходных дефектоскопов. Domin и др. разработали самоходный тепловой дефектоскоп, реализующий ТК по принципу классического одностороннего способа испытаний [19]. Устройство перемещается по поверхности, останавливается в заданной области, запускает нагрев и записывает термограммы, после чего перемещается для проведения контроля следующей зоны. Однако контроль крупногабаритных изделий по зонам требует значительного времени, и применение данного самоходного дефектоскопа подразумевает соблюдение определенной последовательности испытаний отдельных зон. Это затрудняет процедуру «сшивки» отдельных термограмм, а сами термограммы, как правило, неоднородны и менее информативны по сравнению с панорамными термоизображениями, полученными способом сканирования. Следует отметить эффективность данного дефектоскопа при выявлении дефектов, расположенных на различных глубинах, в ходе однократного испытания. Это связано с особенностями классического ТК, при котором температуру контролируемой поверхности регистрируют как в процессе нагрева, так и на стадии охлаждения, а процесс испытаний длится столько, сколько необходимо для проявления температурных сигналов от дефектов, расположенных в широком диапазоне глубин.

Авторами разработан самоходный тепловой дефектоскоп, реализующий ТК способом тепловизионного сканирования. Устройство предназначено для проведения контроля крупногабаритных изделий из композиционных материалов, в частности обнаружения производственных (расслоения и непроклеи) и эксплуатационных (ударные повреждения) дефектов крыльев самолетов, например, самолета MC-21, выполненных из композитов. В приборе реализован способ тепловизионного сканирования без использования роботизированного манипулятора. В отличие от описанного выше аналога [20], данное устройство способно за один проход выявлять дефекты, расположенные в определенном диапазоне глубин, задаваемом оператором. Ниже описаны технические характеристики самоходного дефектоскопа и приведены примеры результатов ТК.

# САМОХОДНЫЙ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП

Основу дефектоскопа составляют оптический нагреватель и тепловизор, а также шаговые двигатели с системой беспроводного управления. Подвижная платформа реализована на базе роликов и поликлиновых ремней, которые обеспечивают плавность хода и достаточную площадь контакта с контролируемой поверхностью, предотвращая «сползание» прибора при передвижении по поверхности с небольшим уклоном. Фото дефектоскопа приведено на рис. 1.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики дефектоскопа, а также области его применения.

Перед проведением контроля оператор «настраивает» дефектоскоп на выявление дефектов в определенном диапазоне глубин, для чего устанавливает скорость перемещения дефектоскопа, мощность нагрева и частоту записи термограмм. С учетом того, что размер поля зрения тепло-

<u>№</u> 4

Дефектоскопия



Рис. 1. Самоходный тепловой дефектоскоп.

Таблица 1

Объекты контроля	из угле- и стеклопластиков, сотовые и сэндвич- панели, теплозащитные покрытия, нанесенные на металлическое основание				
Глубины залегания выявляемых дефектов, мм	0 — 9*				
Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	3×3**				
Площадь зоны одновременного контроля, м <sup>2</sup>	0,07				
Производительность сплошного контроля, м <sup>2</sup> /ч	До 20				
Способ управления движением	Дистанционный (wi-fi)				
Максимальная избыточная температура нагрева объекта контроля, °С	До 70				
Температурная чувствительность, мК	30				
Масса дефектоскопа, кг	12				
Габариты дефектоскопа, м	0,5×0,4×0,4				
Потребляемая мощность, кВт	2				

#### Технические характеристики самоходного теплового дефектоскопа

<sup>\*</sup>Предельная глубина обнаружения дефектов зависит от материала, поперечного размера дефекта и его толщины, а также скорости перемещения дефектоскопа.

\*\*Для расслоения толщиной 0,3 мм, расположенного на глубине 3 мм в углепластике (зависит от материала, глубины залегания дефекта и его толщины).

визора в самоходном дефектоскопе равен  $0,35 \times 0,25 \text{ м}^2$ , а скорость перемещения дефектоскопа может изменяться от 5 до 50 мм/с, обнаруживаемые дефекты характеризуются оптимальным временем обнаружения  $\tau_c$  (моментом наступления максимального температурного контраста *C*) от 4 до 11 с (при скорости перемещения дефектоскопа 50 мм/с) и от 30 до 110 с (при скорости 5 мм/с). Например, дефект размером  $10 \times 10 \times 0,5$  мм, расположенный на глубине 1,5 мм в полиметилметакрилате, характеризуется  $\tau_c \sim 30$  с с момента начала нагрева, а такой же дефект на глубине 6 мм создает максимальный сигнал на контролируемой поверхности при  $\tau_c \sim 130$  с. Следует отметить, что, несмотря на наличие оптимального времени контроля, дефекты обнаруживаются в некотором интервале времен (например, если  $\tau_c \sim 130$  с, то соответствующий дефект проявляется в интервале времени от 100 до 160 с в зависимости от материала).

# ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ ПО ЗОНАМ И ПРИ СКАНИРОВАНИИ

Как было отмечено выше, ТК характеризуется определенными методологическими особенностями в зависимости от используемой процедуры (контроль от зоны к зоне или путем сканирования). Для сравнения результатов, получаемых в двух вышеуказанных процедурах ТК, был проконтролирован набор из 20-и контрольных образцов с искусственными дефектами. Образцы в виде пластин с размерами 300×130×10 мм<sup>3</sup> имитировали многослойную теплозащиту, нанесенную на металлическую основу. Для имитации теплозащиты использовали три слоя полиметилметакрилата толщиной 2 мм каждый, обладающего близкими теплофизическими характеристиками. Образцы содержали плоскодонные дефекты квадратной формы, имитирующие расслоения с различными поперечными размерами и глубиной залегания. Дефекты были выполнены с помощью лазерной резки (погрешность глубины дефектов не превышала ±0,05 мм от запланированной глубины). Схема расположения дефектов приведена на рис. 2. Пластины полиметилметакрилата и дюралюминия толщиной 4 мм были склеены в виде пакета. Для исключения влияния частичной прозрачности полиметилметакрилата при оптическом нагреве образцы были окрашены черной матовой краской с коэффициентом излучения около 0,96.



Рис. 2. Схема расположения дефектов в слое полиметилметакрилата контрольного образца.

Ниже приведены результаты испытаний одного из стандартных образцов, проконтролированного как классическим способом ТК, так и способом тепловизионного сканирования с помощью самоходного дефектоскопа. Следует отметить, что выбранный образец содержал наиболее трудные для идентификации дефекты (параметры дефектов вышеупомянутого образца приведены в табл. 2). Оптимальное время  $\tau_c$  выявления скрытых дефектов исследуемого образца по результатам численного моделирования (программа ThermoCalc-3D, НИ ТПУ) находится в диапазоне от 140 до 190 с.

Как было отмечено выше, конструкционные особенности самоходного дефектоскопа позволяют проводить контроль в ограниченном диапазоне времени. Наиболее подходящий режим работы самоходного дефектоскопа обеспечивает контроль в диапазоне от 30 до 110 с с момента начала нагрева при скорости перемещения дефектоскопа 5 мм/с. При данной скорости движения длительность нагрева каждой точки поверхности образца составляет 6 с. Для унификации параметров испытания в классической процедуре ТК температуру образца регистрировали в диапазоне от 0 до 110 с при той же длительности нагрева. В обоих способах ТК нагреватели представляли собой галогенные лампы мощность 2 кВт, а для регистрации температуры с частотой 10 Гц был использован тепловизор Optris PI640.

#### Таблица 2

	Поперечные размеры дефектов, мм									
Параметр ТК	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	
	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30	35×35	40×40	45×45	
Толщина дефекта, мм	2	2	1,5	1	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	
Глубина дефекта, мм	4	4	4,5	5	5,5	5,7	5,7	5,9	5,9	

Дефекты контрольного образца из полиметилметакрилата на основании из дюралюминия\*

\*Дефекты в виде плоскодонных выемок выполнены в полиметилметакрилате. Глубину дефектов отсчитывают от передней поверхности полиметилметакрилата. Толщина дефектов соответствует высоте выемки в полиметилметакрилате.

На рис. 3 приведены исходные термограммы для 110-й секунды контроля, полученные способом классического ТК (рис. 3*a*) и способом тепловизионного сканировании (рис. 3*б*). Термограмма на рис. 3*б* получена путем прямой реконструкции по способу, описанному в [15], без применения фильтрации и других алгоритмов, повышающих выявляемость дефектов. Данный способ основан на синтезе термограмм изделия путем анализа последовательности термограмм, записанных тепловизором в процессе сканирования. Синтезированную термограмму «складывают» из столбцов отдельных термограмм, причем скорость сканирования, размер элемента изображения на поверхности изделия и частоту записи термограмм выбирают таким образом, чтобы избежать как пропуска, так и наложения столбцов изображений. Каждая синтезированная термограмма соответствует определенной временной задержке относительно момента нагрева, а, изменяя номер столбца, возможно изменять время задержки в требуемом диапазоне.



Рис. 3. Термограммы на 110-й секунде контроля, полученные классическим ТК (*a*) и с помощью самоходного теплового дефектоскопа (*б*).

Из рис. 3 видно, что при одинаковом времени контроля результаты самоходного дефектоскопа существенно лучше результатов классического ТК (оператором выявляются все девять дефектов в сравнении с 2-3 дефектами при классическом ТК). Это объясняется более интенсивным и равномерным нагревом при сканировании (напомним, что длительность нагрева каждой точки образца в обеих процедурах составляла 6 с).

Важным фактором, влияющим на результаты ТК, являются тепловые помехи, создаваемые нагревателем. Для классического ТК характерно остаточное тепловое излучение ламп, которое приводит к неоднородному температурному полю. Для решения данной проблемы используют ряд способов подавления паразитного излучения: фильтры из стекла, непрозрачные шторки и т.п. В случае сканирующего ТК нагреватель находится за пределами контролируемой области, а кожух дефектоскопа защищает зону регистрации температуры от тепловых помех.

Обработка результатов (рис. 4) с помощью метода анализа главных компонент (МАГК) существенно улучшила результаты, полученные с помощью обеих процедур ТК, в частности все дефек-



Рис. 4. Обработка результатов классического (*a*) и сканирующего (*б*) ТК с помощью МАГК: *а* — классический ТК, вторая компонента МАГК; *б* — сканирующий ТК, вторая компонента МАГК.

### Таблица 3

Номер дефекта	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Классический ТК									
Отношение сигнал/шум	3,5	10,5	9,2	9,0	3,5	2,4	3,1	1,1	2,0
ТК способом тепловизионного сканирования									
Отношение сигнал/шум	24,5	60,1	42,3	34,5	10,7	5,4	15,4	13,0	8,3

Сравнение способов ТК по величине отношения сигнал/шум (использованы изображения второй компоненты рис. 4)

ты контрольного образца в той или иной степени были обнаружены. Однако способ тепловизионного сканирования обеспечил более высокую величину отношения сигнал/шум (табл. 3).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты ТК, полученные с помощью самоходного теплового дефектоскопа, характеризуются бо́льшими величинами отношения сигнал/шум по сравнению с классическим ТК, т.е. лучшей выявляемостью дефектов, что связано с более интенсивным и равномерным нагревом. Данный способ тепловизионного сканирования требует более тщательной подготовки испытаний, а именно оптимального выбора параметров контроля: 1) скорости перемещения для обнаружения дефектов, расположенных на определенных глубинах и характеризующихся различными оптимальными временами обнаружения; 2) мощности нагрева в соответствии со скоростью перемещения (во избежание перегрева контролируемого материала); 3) частоты записи термограмм в соответствии со скоростью перемещения для исключения пропусков и наложения строк при реконструкции термограмм. Способ тепловизионного сканирования обеспечивает бо́льшую производительность испытаний крупногабаритных изделий, а использование самоходного дефектоскопа позволяет реализовать данный вид испытаний без участия роботизированных манипуляторов, применение которых целесообразно для контроля изделий сложной формы.

Настоящая разработка выполнена в рамках стипендии Президента РФ № СП-2305.2021.1 (методика испытаний), грантов Российского научного фонда №22-29-01469 (экспериментальное оборудование) и Российского фонда фундаментальных исследований №19-29-13004 (моделирование и обработка данных).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oswald-Tranta B. Comparative study of thermal contrast and contrast in thermal signal derivatives in pulse thermography // NDT E Int. 2017. V. 91. P. 36-46.

2. *Shepard S.M.* Flash Thermography of Aerospace Composites 2. Thermographic Signal Reconstruction // Materials Evaluation. 2007. V. 65. P. 690—696.

3. *Ibarra-Castanedo C., Genest M., Servais P., Maldague X., Bendada A.* Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography // Nondestructive Testing and Evaluation. 2007. V. 22. P. 199–215.

4. *Maldague X., Marinetti S.* Pulse phase infrared thermography // Journal of Applied Physics. 1996. V. 79. P. 2694—2698.

5. *Gordiyenko E.Y.* Nondestructive Testing of Composite Materials of Aircraft Elements by Active Thermography // Nauka ta innovacii. 2018. V. 14. P. 39—50.

6. *Grys S*. Determining the dimension of subsurface defects by active infrared thermography — experimental research // Journal of Sensors and Sensor Systems. 2018. V. 7. P. 153—160.

7. Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Shagdyrov B.I., Vavilov V.P. Method and Equipment for Infrared and Ultrasonic Thermographic Testing of Large-Sized Complex-Shaped Composite Products // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. 57. P. 619–626.

8. Денисов С.С., Волков Я.А., Стороженко В.А., Рапопорт Д.А. Сканирующая оптическая головка для активного неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 1975. № 6. С. 116—118.

9. Гавинский Ю.В., Ворожцов Б.И., Немиров Ю.В. Использование околоповерхностных приемников при тепловом контроле слоистых изделий // Дефектоскопия. 1976. № 4. С. 40—47.

10. Cramer K.E., Winfree W.P. Thermographic detection and quantitative characterization of corrosion by application of thermal line source // Proc. SPIE «Thermosense-XX». 1998. V. 3361. P. 291–297.

11. Woolard D., Cramer K. The thermal photocopier: A new concept for thermal NDT // Proc. SPIE «Thermosense-XXVI». 2004. V. 5405. P. 366—373.
12. Cramer K., Perey D.F., Brown J.L. The application of line scan thermography using multiple

12. Cramer K., Perey D.F., Brown J.L. The application of line scan thermography using multiple collaborative robots // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 2019. Portland, USA. P. 4.

13. Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., Oswald-Tranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V. Detecting and characterizing defects in metal/non-metal structures by using active thermal NDT based on optical/inductive uniform and line-scanning heating approaches // Journal of Nondestructive Evaluation. 2021. V. 40. P. 44.

14. *Moskovchenko A.I., Vavilov V.P., Chulkov A.O.* Comparing the efficiency of defect depth characterization algorithms in the inspection of CFRP by using one-sided pulsed thermal NDT // Infrared Physics and Technology. 2020. V. 107. P. 103289.

15. Dudzik S. Two-stage neural algorithm for defect detection and characterization uses an active thermography // Infrared Physics and Technology. 2015. V. 71. P. 187–197.

16. *Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., Saeed N., Omar M.* Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating defect depth in infrared thermographic nondestructive testing // Infrared Physics and Technology. 2019. V. 102.

17. Saeed N., Omar M.A., Abdulrahman Y. A neural network approach for quantifying defects depth, for nondestructive testing thermograms // Infrared Physics and Technology. 2018. 94. P. 55—64. 18. Fernandes H.C., Zhang H., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Artificial neural networks and infrared

18. *Fernandes H.C., Zhang H., Ibarra-Castanedo C., Maldague X.* Artificial neural networks and infrared thermography for fiber orientation assessment // Proceedings of Brazilian Conference on Intelligent Systems. 2017. P. 210–215.

19. Domin J., Górski M., Bialecki R., Zajac J., Grzyb K., Kielan P., Adamczyk W., Ostrowski Z. Wheeled Robot Dedicated to the Evaluation of the Technical Condition of Large-Dimension Engineering Structures // Robotics. 2020. V. 9. P. 28—42.

УДК 620.179.14

# РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ОДНОРОДНОГО ЦИЛИНДРА КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ, ПОМЕЩЕННОГО В ПРОИЗВОЛЬНОЕ ВНЕШНЕЕ ПОЛЕ

### © 2022 г. В.В. Дякин<sup>1</sup>, О.В. Кудряшова<sup>1,\*</sup>, В.Я. Раевский<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620137 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18 E-mail: \*kudryashova ov@imp.uran.ru; \*\*ravskii@mail.ru

Поступила в редакцию 09.03.2022; после доработки 20.03.2022 Принята к публикации 22.03.2022

Представлен алгоритм нахождения напряженности результирующего магнитного поля внутри и вне однородного цилиндра конечных размеров, помещенного во внешнее магнитное поле произвольной конфигурации, сводящийся в основной его части к решению некоторого количества систем трех одномерных линейных интегральных уравнений. Описаны сложности и способы их преодоления при дискретизации этих уравнений для соответствующей программной реализации. Проведено сравнение результатов работы реализующей описанный алгоритм компьютерной программы в предельных частных случаях с известными аналитическими ответами.

*Ключевые слова*: интегродифференциальное уравнение магнитостатики, цилиндрический магнетик, магнитный неразрушающий контроль.

DOI: 10.31857/S0130308222040078, EDN: BLOMAU

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения многих практических задач из области магнетизма, например, задач неразрушающего магнитного контроля, актуальной является проблема создания обоснованных алгоритмов аналитического или численного решения задач магнитостатики по вычислению напряженности результирующего поля применительно к магнитным телам различной формы, помещенным во внешнее магнитное поле. Обоснованные эффективные методы решения такого рода задач имеются по большей части для безграничных модельных осесимметричных тел относительно простой геометрической формы, помещенных в постоянное внешнее магнитное поле определенного (удобного для аналитического исследования) направления, что позволяло во многих случаях свести задачу к двумерной и пренебречь краевыми эффектами. Однако большой теоретический и практический интерес представляют задачи для реальных тел конечных размеров в произвольном внешнем поле.

Что касается тел с цилиндрической симметрией, давно исследована задача для бесконечно длинного цилиндра с постоянной магнитной проницаемостью, помещенного в бесконечную магнитную среду с иной магнитной проницаемостью, в однородном внешнем поле, решение которой представляется в элементарных функциях [1, с. 245]. В [2] изучена задача расчета напряженности результирующего поля бесконечного магнитного цилиндра при условии неоднородного намагничивания, решение которой записывается через специальные функции. В [3] эта задача исследована для однородного цилиндра конечных размеров в произвольном внешнем поле. В этой работе к возникающему двумерному интегральному уравнению (интегрирование по полной поверхности цилиндра) непосредственно применен метод коллокаций, что приводит к системе линейных уравнений достаточно большой размерности, а для более комфортного вычисления матричных элементов принят ряд упрощающих предположений.

В статье авторов [4] предложен и обоснован подход, сводящий вычисление напряженности магнитного поля от однородного цилиндра конечных размеров, помещенного в произвольное внешнее поле, к решению некоторого количества систем трех одномерных линейных интегральных уравнений. Настоящая работа является продолжением этой статьи и посвящена тонкостям и результатам программной реализации этого подхода, тестированию получаемых результатов на их соответствие физическим законам явления, а также всесторонней проверке адекватности получаемых результатов на предельных случаях с известными «аналитическими» ответами.

Создание подобных алгоритмов и программ расчетов полей с контролируемой точностью диктуется также необходимостью тестирования известных пакетов универсальных программ (типа ELCUT, ANSYS, ELMER), формальное использование которых приводит ко многим проблемам. Подробному описанию недостатков этих программ и подводных камней при их использовании посвящена работа [5].

#### 2. СХЕМА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ РЕАКЦИИ

Для решения задач магнитостатики мы исходим из так называемого основного уравнения магнитостатики, которое в случае однородного магнетика с постоянной магнитной проницаемостью µ имеет вид:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) - \frac{\mu - 1}{4\pi} \nabla \operatorname{div}_{\Omega} \frac{\mathbf{H}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{r}' = \mathbf{H}^{0}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in \mathbb{R}^{3} \setminus S.$$
(1)

Это уравнение эквивалентно системе уравнений Максвелла для случая магнитостатики (см. [6, с. 17], [7, с. 149], [8]) и связывает искомую напряженность результирующего магнитного поля  $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_x(\mathbf{r}), H_y(\mathbf{r}), H_z(\mathbf{r})\}$  в произвольной точке пространства  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  (не лежащей на границе магнетика) с напряженностью  $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0(\mathbf{r}), H_y^0(\mathbf{r}), H_z^0(\mathbf{r})\}$  заданного поля внешнего источника. В уравнении (1)  $\Omega$  есть область в пространстве  $R^3$ , ограниченная поверхностью S и занятая исследуемым магнетиком с заданной постоянной магнитной проницаемостью µ.

Рассмотрим магнетик в форме прямого кругового цилиндра (см. рис. 1). Область  $\Omega$ , занятая магнетиком, представляет собой прямой круговой цилиндр длины *l* с боковой поверхностью *S*<sub>1</sub>, ось которого совмещена с осью *z*, а нижнее и верхнее основания *S*<sub>2</sub> и *S*<sub>3</sub> суть круги радиуса *R*, расположенные в плоскостях *z* = *d* и *z* = *d* + *l* соответственно.



Рис. 1. Однородный цилиндр в магнитном поле.

В нашей работе [4] разработана и обоснована методика вычисления так называемого поля реакции (магнетика)  $\mathbf{H}^{R}(\mathbf{r}) := \mathbf{H}(\mathbf{r}) - \mathbf{H}^{0}(\mathbf{r})$ , которая сводится к схеме, представленной ниже.

Цилиндрические координаты поля реакции  $\mathbf{H}^{R}(r, \phi, z) = \{H_{r}^{R}(r, \phi, z), H_{\phi}^{R}(r, \phi, z), H_{z}^{R}(r, \phi, z)\}$  в произвольной точке пространства с цилиндрическими координатами  $(r, \phi, z)$ , не лежащей на поверхности магнетика  $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$ , вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} H_{r}^{R}(r,\varphi,z) &= \sqrt{\pi}(\mu-1) \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \cos n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} a_{n}^{(1)}(z')\alpha_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - tz')dz' + \int_{0}^{1} a_{n}^{(2)}(r')\alpha_{n}(\overline{r}, r', \overline{z}) dr' + \right. \\ &+ \int_{0}^{1} a_{n}^{(3)}(r')\alpha_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] + \sin n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} b_{n}^{(1)}(z')\alpha_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - t \cdot z') dz' + \\ &+ \int_{0}^{1} b_{n}^{(2)}(r')\alpha_{n}(\overline{r}, r', \overline{z}) dr' + \int_{0}^{1} b_{n}^{(3)}(r')\alpha_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] \right\}; \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} H_{\varphi}^{R}(r,\varphi,z) &= -\sqrt{\pi}(\mu-1) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \cos n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} b_{n}^{(1)}(z')\beta_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - tz')dz' + \\ &+ \int_{0}^{1} b_{n}^{(2)}(r')\beta_{n}(\overline{r}, r', \overline{z}) dr' + \int_{0}^{1} b_{n}^{(3)}(r')\beta_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] - \sin n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} a_{n}^{(1)}(z')\beta_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - t \cdot z') dz' + \\ &+ \int_{0}^{1} a_{n}^{(2)}(r')\beta_{n}(\overline{r}, r', \overline{z}) dr' + \int_{0}^{1} a_{n}^{(3)}(r')\beta_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] \right\}; \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} H_{z}^{R}(r,\varphi,z) &= \sqrt{\pi}(\mu-1) \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \cos n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} a_{n}^{(1)}(z')\gamma_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - tz') dz' + \\ &+ \int_{0}^{1} a_{n}^{(3)}(r')\gamma_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] + \sin n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} b_{n}^{(1)}(z')\gamma_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - tz') dz' + \\ &+ \int_{0}^{1} a_{n}^{(3)}(r')\gamma_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] + \sin n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} b_{n}^{(1)}(z')\gamma_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - tz') dz' + \\ &+ \int_{0}^{1} a_{n}^{(3)}(r')\gamma_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] + \sin n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} b_{n}^{(1)}(z')\gamma_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - tz') dz' + \\ &+ \int_{0}^{1} b_{n}^{(2)}(r')\gamma_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] + \sin n\varphi \left[ t \int_{0}^{1} b_{n}^{(1)}(z')\gamma_{n}(\overline{r}, 1, \overline{z} - tz') dz' + \\ &+ \int_{0}^{1} b_{n}^{(2)}(r')\gamma_{n}(\overline{r}, r', \overline{z} - t) dr' \right] \right\}, \end{aligned}$$

где

$$\overline{r} := \frac{r}{R}, \quad \overline{z} := \frac{z-d}{R}, \quad t := \frac{l}{R};$$
(5)

$$\alpha_{n}(a,b,q) := \frac{(-1)^{n+1}b\delta(a,b,q)}{a\Gamma(n-\frac{1}{2})} \left\{ \left[a^{2} - \frac{n(a^{2}+b^{2}+q^{2})}{2n+1}\right]P_{\frac{1}{2}}^{n}(\varepsilon(a,b,q)) + \frac{2ab}{4n^{2}-1}P_{\frac{1}{2}}^{n+1}(\varepsilon(a,b,q))\right\}; \quad (6)$$

$$\beta_{n}(a,b,q) := \frac{(-1)^{n+1}nb\delta(a,b,q)}{a\Gamma(n-\frac{1}{2})} \left[ \frac{a^{2}+b^{2}+q^{2}}{2n+1} P_{\frac{1}{2}}^{n}(\varepsilon(a,b,q)) + \frac{4ab}{4n^{2}-1} P_{\frac{1}{2}}^{n+1}(\varepsilon(a,b,q)) \right];$$
(7)

$$\gamma_n(a,b,q) := \frac{(-1)^{n+1} bq \delta(a,b,q)}{\Gamma(n-\frac{1}{2})} P_{\frac{1}{2}}^n(\varepsilon(a,b,q)).$$
(8)

В формулах (6)—(8):

где  $P_{\frac{1}{2}}^{n}(\cdot)$  — присоединенная функция Лежандра [9],  $\Gamma(\cdot)$  — гамма-функция.

Дефектоскопия № 4 2022

Функции  $\left\{a_n^{(1)}(z), a_n^{(2)}(r), a_n^{(3)}(r)\right\}_{n=0}^{\infty}$  в (2) — (4) для каждого n = 0, 1, 2, ... есть решение системы одномерных линейных интегральных уравнений:

$$a_{n}^{(1)}(z) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} a_{n}^{(1)}(z')\alpha_{n}(1, 1, t(z-z')) dz' + \int_{0}^{1} a_{n}^{(2)}(r')\alpha_{n}(1, r', tz) dr' + \int_{0}^{1} a_{n}^{(3)}(r')\alpha_{n}(1, r', t(1-z)) dr' \right] = \frac{2}{\mu+1} a_{n}^{(01)}(z);$$
(10)

$$a_n^{(2)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_0^1 a_n^{(1)}(z')\gamma_n(r, 1, tz') dz' + \int_0^1 a_n^{(3)}(r')\gamma_n(r, r', t) dr' \right] = \frac{2}{\mu + 1} a_n^{(02)}(r);$$
(11)

$$a_n^{(3)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_0^1 a_n^{(1)}(z')\gamma_n(r, 1, t(1-z'))dz' + \int_0^1 a_n^{(2)}(r')\gamma_n(r, r', t)dr' \right] = \frac{2}{\mu+1} a_n^{(03)}(r).$$
(12)

Функции  $\left\{ b_n^{(1)}(z), b_n^{(2)}(r), b_n^{(3)}(r) \right\}_{n=1}^{\infty}$  в (2)—(4) для каждого n = 1, 2, ... есть решение системы одномерных линейных интегральных уравнений:

$$b_{n}^{(1)}(z) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} b_{n}^{(1)}(z') \alpha_{n}(1, 1, t(z-z')) dz' + \int_{0}^{1} b_{n}^{(2)}(r') \alpha_{n}(1, r', tz) dr' + \int_{0}^{1} b_{n}^{(3)}(r') \alpha_{n}(1, r', t(1-z)) dr' \right] = \frac{2}{\mu+1} b_{n}^{(01)}(z);$$
(13)

$$b_n^{(2)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_0^1 b_n^{(1)}(z')\gamma_n(r,1,tz')dz' + \int_0^1 b_n^{(3)}(r')\gamma_n(r,r',t)dr' \right] = \frac{2}{\mu+1} b_n^{(02)}(r);$$
(14)

$$b_n^{(3)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_0^1 b_n^{(1)}(z') \gamma_n(r, 1, t(1-z')) dz' + \int_0^1 b_n^{(2)}(r') \gamma_n(r, r', t) dr' \right] = \frac{2}{\mu + 1} b_n^{(03)}(r).$$
(15)

В системах (10)—(12) и (13)—(15) параметр  $\lambda = (\mu - 1)/(\mu + 1)$ , а сами системы отличаются только правыми частями и обозначениями искомых функций. Функции в правых частях этих систем  $\left\{a_n^{(01)}(z), a_n^{(02)}(r), a_n^{(03)}(r)\right\}_{n=0}^{\infty}$  и  $\left\{b_n^{(01)}(z), b_n^{(02)}(r), b_n^{(03)}(r)\right\}_{n=1}^{\infty}$  суть коэффициенты разложения известных функций  $\Psi_1^0(\varphi, z), \Psi_2^0(r, \varphi), \Psi_3^0(r, \varphi)$  (связанных с заданным внешним полем  $\mathbf{H}^0(\mathbf{r})$ ) в ряд Фурье вида:

$$\Psi_1^0(\varphi, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[ a_n^{(01)}(z) \cos n\varphi + b_n^{(01)}(z) \sin n\varphi \right];$$
(16)

$$\Psi_2^0(r,\phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[ a_n^{(02)}(r) \cos n\phi + b_n^{(02)}(r) \sin n\phi \right];$$
(17)

$$\Psi_3^0(r,\phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[ a_n^{(03)}(r) \cos n\phi + b_n^{(03)}(r) \sin n\phi \right], \tag{18}$$

где

$$\psi_1^0(\phi, z) = H_n^0(R\cos\phi, R\sin\phi, lz + d), \quad \phi \in (-\pi, \pi], \quad z \in [0, 1];$$
(19)

$$\psi_2^0(r,\phi) = H_n^0(Rr\cos\phi, Rr\sin\phi, d), \quad \phi \in (-\pi,\pi], \quad r \in [0, 1];$$
(20)

$$\psi_{3}^{0}(r,\phi) = H_{n}^{0}(Rr\cos\phi, Rr\sin\phi, l+d), \quad \phi \in (-\pi,\pi], \ r \in [0, 1],$$
(21)

а  $H_n^0(x, y, z)$  — нормальные составляющие заданного внешнего поля  $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^0(x, y, z)$  в декартовой системе координат на боковой поверхности цилиндра  $S_1$  (в (19)), на его нижнем  $S_2$  (в (20)) и верхнем  $S_3$  основании (в (21)), а  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  — декартовы координаты точки. Для расчета декартовых координат поля реакции  $\mathbf{H}^R(\mathbf{r})$  в точках  $\mathbf{r} = (0, 0, z)$  на оси цилиндра

Для расчета декартовых координат поля реакции  $\mathbf{H}^{\kappa}(\mathbf{r})$  в точках  $\mathbf{r} = (0,0,z)$  на оси цилиндра (внутри или вне его, т.е. *z* либо внутри интервала (d, d+l), либо вне отрезка [d, d+l]) в работе [4] получены следующие расчетные формулы:

$$H_{x}^{R}(0,0,z) = -\frac{\mu - 1}{4} \left\{ t \int_{0}^{1} a_{1}^{(1)}(z') \left[ 1 + (\overline{z} - tz')^{2} \right]^{-3/2} dz' + \int_{0}^{1} a_{1}^{(2)}(r') r'^{2} \left( r'^{2} + \overline{z}^{2} \right)^{-3/2} dr' + \int_{0}^{1} a_{1}^{(3)}(r') \cdot r'^{2} \left[ r'^{2} + (\overline{z} - t)^{2} \right]^{-3/2} dr' \right\};$$
(22)

$$H_{y}^{R}(0,0,z) = -\frac{\mu - 1}{4} \Biggl\{ t_{0}^{1} b_{1}^{(1)}(z') \Bigl[ 1 + (\overline{z} - tz')^{2} \Bigr]^{-3/2} dz' + \int_{0}^{1} b_{1}^{(2)}(r')r'^{2} \Bigl( r'^{2} + \overline{z}^{2} \Bigr)^{-3/2} dr' + \\ + \int_{0}^{1} b_{1}^{(3)}(r')r'^{2} \Bigl[ r'^{2} + (\overline{z} - t)^{2} \Bigr]^{-3/2} dr' \Biggr\};$$

$$H_{z}^{R}(0,0,z) = \frac{\mu - 1}{2} \Biggl\{ t_{0}^{1} a_{0}^{(1)}(z') (\overline{z} - t \cdot z') \Bigl[ 1 + (\overline{z} - tz')^{2} \Bigr]^{-3/2} dz' + \Biggr\}$$

$$(23)$$

$$+ \overline{z} \int_{0}^{1} a_{0}^{(2)}(r') r' (r'^{2} + \overline{z}^{2})^{-3/2} dr' + (\overline{z} - t) \int_{0}^{1} a_{0}^{(3)}(r') r' [r'^{2} + (\overline{z} - t)^{2}]^{-3/2} dr' \bigg\},$$
(24)

где функции  $\{a_0^{(1)}(z), a_0^{(2)}(r), a_0^{(3)}(r)\}$  — решение системы (10) — (12) для  $n = 0, \{a_1^{(1)}(z), a_1^{(2)}(r), a_1^{(3)}(r)\}$  — решение системы (10) — (12) для  $n = 1, a \{b_1^{(1)}(z), b_1^{(2)}(r), b_1^{(3)}(r)\}$  — решение системы (13)—(15) для n = 1.

Для случая постоянного внешнего поля  $\mathbf{H}^0 = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\}$ , где  $H_x^0, H_y^0, H_z^0$  — константы, формулы (2)—(4) для цилиндрических координат поля реакции  $\mathbf{H}^R$  упрощаются таким образом, что в (2) и (4) ненулевыми оказываются только два первых члена ряда, а в (3) — только первый член ряда. При этом участвующие в этих формулах функции  $a_0^{(1)}(z), a_0^{(2)}(r), a_0^{(3)}(r)$  суть решение системы:

$$a_{0}^{(1)}(z) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} a_{0}^{(1)}(z') \alpha_{0}(1, 1, t(z-z')) dz' + \int_{0}^{1} a_{0}^{(2)}(r') \alpha_{0}(1, r', tz) dr' + \int_{0}^{1} a_{0}^{(3)}(r') \alpha_{0}(1, r', t(1-z)) dr' \right] = 0;$$
(25)

$$a_0^{(2)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_0^1 a_0^{(1)}(z')\gamma_0(r, 1, tz') dz' + \int_0^1 a_0^{(3)}(r')\gamma_0(r, r', t) dr' \right] = -\frac{2}{\mu+1}H_z^0;$$
(26)

Дефектоскопия № 4 2022

$$a_{0}^{(3)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} a_{0}^{(1)}(z') \gamma_{0}(r, 1, t(1-z')) dz' + \int_{0}^{1} a_{0}^{(2)}(r') \gamma_{0}(r, r', t) dr' \right] = \frac{2}{\mu+1} H_{z}^{0}, \quad (27)$$

где функции  $a_1^{(1)}(z), a_1^{(2)}(r), a_1^{(3)}(r)$  — решение системы:

$$a_{1}^{(1)}(z) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} a_{1}^{(1)}(z') \alpha_{1}(1, 1, t(z-z')) dz' + \int_{0}^{1} a_{1}^{(2)}(r') \alpha_{1}(1, r', tz) dr' + \int_{0}^{1} a_{1}^{(3)}(r') \alpha_{1}(1, r', t(1-z)) dr' \right] = \frac{2}{\mu+1} H_{x}^{0};$$
(28)

$$a_{1}^{(2)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} a_{1}^{(1)}(z')\gamma_{1}(r, 1, tz') dz' + \int_{0}^{1} a_{1}^{(3)}(r')\gamma_{1}(r, r', t) dr' \right] = 0;$$
(29)

$$a_{1}^{(3)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} a_{1}^{(1)}(z') \gamma_{1}(r, 1, t(1-z')) dz' + \int_{0}^{1} a_{1}^{(2)}(r') \gamma_{1}(r, r', t) dr' \right] = 0, \quad (30)$$

а функции  $b_1^{(1)}(z), b_1^{(2)}(r), b_1^{(3)}(r)$  — решение системы:

$$b_{1}^{(1)}(z) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} b_{1}^{(1)}(z') \alpha_{1}(1, 1, t(z-z')) dz' + \int_{0}^{1} b_{1}^{(2)}(r') \alpha_{1}(1, r', tz) dr' + \int_{0}^{1} b_{1}^{(3)}(r') \alpha_{1}(1, r', t(1-z)) dr' \right] = \frac{2}{\mu+1} H_{y}^{0};$$
(31)

$$b_{1}^{(2)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} b_{1}^{(1)}(z')\gamma_{1}(r, 1, tz') dz' + \int_{0}^{1} b_{1}^{(3)}(r')\gamma_{1}(r, r', t) dr' \right] = 0;$$
(32)

$$b_{1}^{(3)}(r) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left[ t \int_{0}^{1} b_{1}^{(1)}(z')\gamma_{1}(r, 1, t(1-z')) dz' + \int_{0}^{1} b_{1}^{(2)}(r')\gamma_{1}(r, r', t) dr' \right] = 0,$$
(33)

где

$$\alpha_{0}(1,b,q) = \frac{b\delta(1,b,q)}{2\sqrt{\pi}} \Big[ P_{\frac{1}{2}}^{0} \big( \varepsilon(1,b,q) \big) - 2bP_{\frac{1}{2}}^{1} \big( \varepsilon(1,b,q) \big) \Big];$$
(34)

$$\gamma_{0}(a,b,q) = \frac{bq\delta(a,b,q)}{2\sqrt{\pi}} P_{\frac{1}{2}}^{0}(\varepsilon(a,b,q));$$
(35)

$$\alpha_{1}(1,b,q) = \frac{b\delta(1,b,q)}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{2-b^{2}-q^{2}}{3} P_{\frac{1}{2}}^{1}(\varepsilon(1,b,q)) + \frac{2b}{3} P_{\frac{1}{2}}^{2}(\varepsilon(1,b,q)) \right];$$
(36)

$$\gamma_1(a,b,q) = \frac{bq\delta(a,b,q)}{\sqrt{\pi}} P_{\frac{1}{2}}^1(\varepsilon(a,b,q)).$$
(37)

## 3. ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Для реализации указанной в предыдущем параграфе схемы была составлена компьютерная программа на языке ФОРТРАН. Основным по алгоритмической и аналитической трудоемкости пунктом этой схемы является нахождение численного решения системы линейных одномерных интегральных уравнений (10)—(12) (система (13)—(15) отличается от нее только правой частью). Для дискретизации этой системы интегральных уравнений был применен метод квадратур [10, с. 157], а в качестве квадратурной формулы, заменяющей интегралы в системе (10)—(12), выбрана формула средних прямоугольников, которая при разбиении отрезка интегрирования [0, 1] на *т* равных частей имеет вид:

$$\int_{0}^{1} f(x)dx \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} f(x_{i}),$$
(38)

где узлы формулы:

$$x_i = \frac{2i-1}{2m}, \quad i = 1, ..., m.$$
 (39)

Прежде чем с помощью (38) и (39) выписать дискретное приближение системы (10)—(12), необходимо преобразовать первый интеграл в левой части (10), поскольку его ядро  $\alpha_n(1, 1, t(z-z'))$ имеет (интегрируемую) логарифмическую особенность при z' = z. А, именно, можно показать, что для всех n = 0, 1, ... при  $q \rightarrow 0$ :

$$\alpha_{n}(1, 1, q) = -\frac{1}{4\pi^{3/2}} \left( \ln |q| - D_{n} \right) + O(q \ln |q|),$$

$$D_{n} := \ln 8 - 2 \left( \sum_{k=1}^{n+1} \frac{1}{2k-1} - \frac{1}{2n+1} \right) - 1.$$
(40)

Выделяя стандартным образом указанную особенность [10, с. 159, 160], получим эквивалентный вид уравнения (10):

$$a_{n}^{(1)}(z) - 2\lambda\sqrt{\pi} \left\{ t \left[ \int_{0}^{1} \left( a_{n}^{(1)}(z') - a_{n}^{(1)}(z) \right) \alpha_{n}(1, 1, t(z-z')) dz' + a_{n}^{(1)}(z) \int_{0}^{1} \alpha_{n}(1, 1, t(z-z')) dz' \right] + \int_{0}^{1} a_{n}^{(2)}(r') \alpha_{n}(1, r', tz) dr' + \int_{0}^{1} a_{n}^{(3)}(r') \alpha_{n}(1, r', t(1-z)) dr' \right\} = \frac{2}{\mu+1} a_{n}^{(01)}(z).$$

$$(41)$$

Заменяя в системе (41), (11), (12) интегралы квадратурными формулами вида (38), (39), после некоторых преобразований получим для определения дискретных аналогов искомых функций

$$\left\{a_n^{(1)}(x_1), \dots, a_n^{(1)}(x_m); a_n^{(2)}(x_1), \dots, a_n^{(2)}(x_m); a_n^{(3)}(x_1), \dots, a_n^{(3)}(x_m)\right\}$$
(42)

следующую систему из 3*т* уравнений:

$$(q + mp_k^n)a_n^{(1)}(x_k) + \sum_{i=1}^m a_{ki}^n \left(a_n^{(1)}(x_i) - a_n^{(1)}(x_k)\right) + \sum_{i=1}^m b_{ik}^n a_n^{(2)}(x_i) + \sum_{i=1}^m b_{i,m+1-k}^n a_n^{(3)}(x_i) = fa_n^{(01)}(x_k), \quad k = 1, \dots, m;$$

$$(43)$$

$$qa_n^{(2)}(x_k) + \sum_{i=1}^m c_{ik}^n a_n^{(1)}(x_i) + \sum_{i=1}^m d_{ik}^n a_n^{(3)}(x_i) = fa_n^{(02)}(x_k), \quad k = 1, \dots, m;$$

$$qa_n^{(3)}(x_k) + \sum_{i=1}^m c_{m+1-i,k}^n a_n^{(1)}(x_i) + \sum_{i=1}^m d_{ik}^n a_n^{(2)}(x_i) = fa_n^{(03)}(x_k), \quad k = 1, \dots, m,$$
(45)

которая естественным образом сводится к стандартному виду системы 3*m* линейных уравнений относительно 3*m* неизвестных (42). В формулах (43) — (45) приняты обозначения:

$$q := -\frac{m}{2\lambda t \sqrt{\pi}}, \qquad a_{ki}^{n} := \begin{cases} 0, & k = i \\ \alpha_{n} \left( 1, \ 1, \ t(x_{k} - x_{i}) \right), & k \neq i \end{cases}, \qquad k, i = 1, \ \dots, m;$$
(46)

$$b_{ik}^{n} := \frac{\alpha_{n}(1, x_{i}, tx_{k})}{t}, \quad c_{ik}^{n} := \gamma_{n}(x_{k}, 1, tx_{i}), \quad d_{ik}^{n} := \frac{\gamma_{n}(x_{k}, x_{i}, t)}{t}, \quad k, i = 1, \dots, m;$$
(47)

$$f := -\frac{m}{\sqrt{\pi(\mu - 1)t}}, \quad p_k^n := \int_0^1 \alpha_n \left(1, 1, t(x_k - x)\right) dx, \quad k = 1, \dots, m.$$
(48)

Интеграл в (48) — сходящийся несобственный 2 рода, поэтому для применения квадратурных формул он был преобразован с учетом асимптотики (40) к следующему виду:

$$p_k^n := \int_0^1 \left[ \alpha_n \left( 1, 1, t(x_k - x) \right) + \frac{1}{4\pi^{3/2}} \left( \ln t + \ln |x_k - x| - D_n \right) \right] dx - \frac{1}{4\pi^{3/2}} \left[ \ln t - D_n + x_k \ln x_k + (1 - x_k) \ln(1 - x_k) - 1 \right].$$

В этом выражении интеграл особенностей не имеет, поскольку, согласно (40), подынтегральная функция имеет порядок  $O(|x - x_k| \ln |x - x_k|)$  при  $x \to x_k$ .

После аналогичной замены в системе (13) — (15) интегралов квадратурными формулами вида (38), (39) для определения дискретных аналогов искомых функций

$$\left\{b_{n}^{(1)}(x_{1}),\ldots,b_{n}^{(1)}(x_{m});\ b_{n}^{(2)}(x_{1}),\ldots,b_{n}^{(2)}(x_{m});\ b_{n}^{(3)}(x_{1}),\ldots,b_{n}^{(3)}(x_{m})\right\}$$
(49)

получаем ту же систему линейных уравнений (43) — (45) с естественной заменой в правых частях  $a_n^{(01)}(x_k), a_n^{(02)}(x_k), a_n^{(03)}(x_k)$  на  $b_n^{(01)}(x_k), b_n^{(02)}(x_k), b_n^{(03)}(x_k)$  соответственно. После решения указанных систем линейных уравнений приближенное вычисление компонент

После решения указанных систем линейных уравнений приближенное вычисление компонент поля реакции проводится по формулам (2) — (4) и (22) — (24) с естественной заменой интегралов в них квадратурными формулами вида (38), (39) с использованием полученных дискретных аналогов искомых функций (42) и (49).

При вычислении матричных элементов системы (43) — (46), а также при последующем вычислении компонент поля реакции, используются при различных значениях их параметров функции  $\alpha_n(a,b,q)$ ,  $\beta_n(a,b,q)$ ,  $\gamma_n(a,b,q)$ , определенные формулами (6)—(8), каждая из которых содержит вычисление функции Лежандра  $P_{\frac{1}{2}}^n(z)$  при  $z = \varepsilon(a,b,q)$  в (9). Линейные размеры R и l цилиндра могут меняться произвольным образом (для проверки правильности работы программы рассматриваются и предельные случаи с известными аналитическими ответами бесконечно длинного цилиндра  $l \to \infty$  и пластины конечной толщины  $R \to \infty$ ), а потому аргумент z функции Лежандра может принимать сколько угодно большие значения ( $z \to \infty$ ) и как угодно близкие к 1 ( $z \to 1+0$ ). Для подбора наилучшей вычислительной формулы для этой функции при различных значениях аргумента проводились численные эксперименты с ее представлением через гипергеометрические функции различного типа (например, [9, с. 128, формула (16)] и [9, с. 130, формула (24)]), через интегральное представление [9, с. 158, формула (14)], рекуррентные формулы [9, с. 161, формула (1)]. Наилучшей по точности оказалась комбинированная формула, учитывающая асимптотическое поведение при  $z \to +\infty$ , а также предельное поведение при  $z \to 1 + 0$ . За основу для n = 0, 1, 2, ... взята формула

$$P_{\frac{1}{2}}^{n}(z) = \frac{(-1)^{n}}{\sqrt{2}} R_{n} \sqrt{z+1} \left(\frac{z-1}{z+1}\right)^{n/2} F\left(n-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}; n+1; \frac{z-1}{z+1}\right),$$
(50)

где F(a, b; c; z) — гипергеометрическая функция [9, с. 69]),  $R_0:=1, R_n:=\prod_{i=1}^n \left(i-1-\frac{3}{4i}\right), n=1, 2, ....$ При достаточно больших значениях z используется асимптотическая формула

$$P_{\frac{1}{2}}^{n}(z) = \frac{(-1)^{n+1}\sqrt{2} \Gamma\left(n-\frac{1}{2}\right)}{\pi^{3/2}} \sqrt{z} \left\{ 1 - \frac{(4n^{2}-1)\ln z}{8z^{2}} + \left[\frac{4n^{2}-1}{8}\left(\frac{1}{2} - 3\ln 2 + 2\sum_{k=1}^{n+1}\frac{1}{2k-1}\right) - \frac{n(n+1)}{2} + \frac{1}{8}\right] \frac{1}{z^{2}} \right\} + O\left(\frac{\ln z}{z^{5/2}}\right),$$
(51)

а для значений *z*, близких к 1, используется соотношение  $\lim_{z \to 1+0} P_{\frac{1}{2}}^n(z) = \delta_{n0}$  ( $\delta_{ij}$  — символ Кронекера) [9, с. 164, формула (4)]. Формула (50) получена из представления [9, с. 128, формула (16)]

$$P_{\frac{1}{2}}^{n}(z) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{z+1}\left(\frac{z+1}{z-1}\right)^{n/2}\frac{1}{\Gamma(1-n)}F\left(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}-n; 1-n; \frac{z-1}{z+1}\right)$$

с учетом соотношения [11, с. 1014, формула (9.101)]

$$\lim_{\gamma \to -n} \frac{F(\alpha,\beta;\gamma;z)}{\Gamma(\gamma)} = \frac{\alpha(\alpha+1)\cdots(\alpha+n)\beta(\beta+1)\cdots(\beta+n)}{(n+1)!} z^{n+1}F(\alpha+n+1,\beta+n+1;n+2,z).$$

Формула (51) получается из (50) с использованием соотношения для гипергеометрической

функции, приведенного в [9, с. 117, формула (12)], и некоторых преобразований. При вычислении  $a_{ki}^n$  в (46) и  $p_k^n$  в (48) возникает необходимость использования формулы (6) для  $\alpha_n(a, b, q)$  при a = b = 1 и достаточно малых значениях q. В этом случае особенность типа (40) вносит достаточную погрешность в численные расчеты по формуле (6). Поэтому для вычисления  $\alpha_{1}(1, 1, q)$  при малых q из (6), (50) и представления гипергеометрической функции в форме, использующей у-функцию [9, с. 117, формула (12)], в результате достаточно длительных преобразований получена следующая формула:

$$\alpha_n(1,1,q) = \frac{\left(1 - \frac{1}{x}\right)^{n/2}}{4\pi^{3/2}(2n+1)\Gamma\left(n - \frac{1}{2}\right)(q^2 + 4)^{3/4}} \left[\frac{B_n(x)}{(xq)^{3/2}} - n\sqrt{xq}A_n(x)\right],\tag{52}$$

где

$$x := \frac{1}{2} \left( \frac{2+q^2}{q\sqrt{4+q^2}} + 1 \right);$$

$$B_n(x) := \Gamma\left(n - \frac{1}{2}\right) \left[2n + 1 + \left(1 + \frac{2n+1}{4x}\right)\sum_{k=0}^{\infty} c_k(x)\right] + \frac{2}{2n-1}\sqrt{1 - \frac{1}{x}} Q_{n+1}(x) - Q_n(x)\right]$$

$$A_n(x) := 8\Gamma\left(n - \frac{1}{2}\right) \left(1 + \frac{2n-1}{4x}\right) - \frac{1}{x^2}Q_n(x);$$
  
$$c_0(x) := 1, \ c_{k+1}(x) := \frac{2k+3}{2(k+3)x}c_k(x), \ k = 0, \ 1, \ \dots; \ \ Q_n(x) := \sum_{k=0}^{\infty} a_k(n,x) \ b_k(n,x);$$

Дефектоскопия <u>№</u> 4 2022

$$\begin{aligned} a_0(n,x) &\coloneqq \Gamma\left(n+\frac{3}{2}\right), \ a_{k+1}(n,x) \coloneqq \frac{\left(k+\frac{3}{2}\right)\left(k+\frac{3}{2}+n\right)}{(k+1)(k+3)x} a_k(n,x), \ k=0,\ 1,\ \dots; \\ b_0(n,x) &\coloneqq -\frac{1}{2} + \ln 16 - 2\sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{2i-1} + \ln x; \\ b_{k+1}(n,x) &\coloneqq b_k(n,x) + \frac{1}{k+1} + \frac{1}{k+3} - \frac{1}{k+\frac{3}{2}} - \frac{1}{k+\frac{3}{2}+n}, \ k=0,\ 1,\ \dots. \end{aligned}$$

Как показали численные эксперименты, формула (52) дает при малых значениях q достаточно точные результаты для  $\alpha_n(1, 1, q)$  при замене рядов в  $B_n(x)$  и  $Q_n(x)$  на конечные суммы с относительно небольшим числом слагаемых (в программе хватало 10 слагаемых).

#### 4. ПРОВЕРКА НА ИЗВЕСТНЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ СЛУЧАЯХ

В виду сложности и объемности аналитических преобразований, приведших к описанному выше алгоритму вычисления напряженности поля реакции (а потому и результирующего поля) от однородного цилиндра, а также объемности реализующей этот алгоритм компьютерной программы, важное значение приобретает качественная и количественная проверка результатов работы этой программы.

Было проделано качественное тестирование, предполагающее проверку наличия определенной симметрии вычисляемой напряженности результирующего поля в зависимости от типа симметрии напряженности поля внешнего источника. В частности, если напряженность постоянного внешнего поля **Н**<sup>0</sup> направлена по оси *z*, то для компонент напряженности результирующего поля в любой точке вне или внутри цилиндра должно быть выполнено  $H_{0} = 0$ , а  $H_{z}$  и  $H_{r}$  не зависят от  $\varphi$ . Если напряженность такого поля  $\mathbf{H}^0$  направлена по оси x, то при смене координаты  $\phi$  точки наблюдения на  $(-\phi)$  декартовы координаты  $H_x$  и  $H_z$  не меняются, а  $H_y$  меняет знак. Если же напряженность  $\mathbf{H}^0$ направлена по оси y, то при смене координаты  $\phi$  точки наблюдения на  $\pi$ - $\phi$  координаты  $H_{\mu}$  и  $H_{\mu}$  не меняются, а Н, меняет знак. Кроме того, при значительном удалении точки наблюдения от магнетика результирующее поле должно практически совпадать с полем внешнего источника.

Было проведено и многократное количественное тестирование результатов работы программы, заключающееся в количественном сравнении их в предельных случаях цилиндрической формы магнетика (бесконечно длинный цилиндр, бесконечная пластина конечной толщины), для которых в случае погружения в постоянное внешнее поле известны точные аналитические формулы напряженности результирующего поля вне и внутри магнетика. Ниже приводятся типичные результаты женности результирующего поля вне и внутри магнетика. ниже приводятся типичные результаты такого сравнения. Напряженность внешнего поля  $\mathbf{H}^0 = \{H^0_x, H^0_y, H^0_z\}$  при указанном тестировании бралась постоянной как внутри магнетика, так и в той его окрестности, где производится вычисление напряженности результирующего поля:  $H^0_x = 10$ ,  $H^0_y = 20$ ,  $H^0_z = 30$ . Цилиндр рассматривался симметричным относительно плоскости z = 0 (то есть параметр d = -l/2).

Для бесконечно длинного цилиндра с осью вдоль оси z использовались следующие формулы для напряженности **H** =  $\{H_{x}, H_{y}, H_{z}\}$  постоянного результирующего поля внутри магнетика [12, с. 209], [13, c. 339]:

$$H_{x} = \frac{2H_{x}^{0}}{1+\mu}, \quad H_{y} = \frac{2H_{y}^{0}}{1+\mu}, \quad H_{z} = H_{z}^{0}.$$
(53)

Программе задавались следующие параметры:  $\mu = 19, R = 2, l = 250, m = 800,$  цилиндрические координаты точки наблюдения  $r = 1,5, \varphi = \pi/3, z = 3$ . По формуле (53) получаются значения  $H_r = 1$ ,  $H_y = 2, H_z = 30$ ; программа дала  $H_x = 0,9994, H_y = 1,999, H_z = 29,93.$ Напряженность результирующего поля вне указанного бесконечно длинного цилиндра в точке

наблюдения с декартовыми координатами (x, y, z) [14, c. 245]:

$$H_{x} = H_{x}^{0} + p \Big[ H_{x}^{0}(x^{2} - y^{2}) + 2H_{y}^{0}xy \Big], \quad H_{y} = H_{y}^{0} + p \Big[ H_{y}^{0}(y^{2} - x^{2}) + 2H_{x}^{0}xy \Big], \quad H_{z} = H_{z}^{0}, \tag{54}$$
где  $p := \lambda R^2 / (x^2 + y^2)^2$ . Программе задавались те же параметры, а точка наблюдения вне цилиндра имеет координаты r = 3,  $\varphi = \pi/3$ , z = 3. Формула (54) дает результаты  $H_x = 14,928$ ,  $H_y = 27,464$ ,  $H_z = 30$ ; программа —  $H_x = 14,930$ ,  $H_y = 27,469$ ,  $H_z = 29,925$ .

Рассмотрим однородный магнетик, занимающий область  $\Omega$  между двумя параллельными плоскостями с уравнениями z = -l/2 и z = l/2 (бесконечная пластина конечной толщины). Форма такой пластины является предельным случаем (радиус основания  $R \to \infty$ ) соответствующего цилиндра высоты *l*. Напряженность результирующего поля внутри и вне пластины [13, с. 339]:

$$H_{x} = H_{x}^{0}, \quad H_{y} = H_{y}^{0}, \quad H_{z} = \frac{1}{\mu}H_{z}^{0}, \quad \mathbf{r} \in \overline{\Omega}; \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}^{0} = \{H_{x}^{0}, H_{y}^{0}, H_{z}^{0}\}, \quad \mathbf{r} \notin \overline{\Omega}.$$
 (55)

Программе были заданы следующие параметры:  $\mu = 20, R = 800, l = 6, m = 800$ ; цилиндрические координаты точки наблюдения внутри цилиндра  $r = 3, \varphi = \pi/3, z = 2$ , а вне цилиндра  $r = 3, \varphi = \pi/3, z = 5$ . По формулам (55) значения напряженности результирующего поля внутри цилиндра  $H_x = 10, H_y = 20, H_z = 1,5$ , а вне его  $H_x = 10, H_y = 20, H_z = 30$ . Программа дала соответственно  $H_x = 9,65, H_y = 19,3, H_z = 1,54$  и  $H_x = 9,65, H_y = 19,3, H_z = 30,12$ . Следующий проделанный вид тестирования работы программы, реализующей предложен-

Следующий проделанный вид тестирования работы программы, реализующей предложенный алгоритм, касается проверки выполнения необходимых граничных условий. В точках границы *S* магнетика для нормальной составляющей  $H_n$  напряженности результирующего поля должно выполняться  $H_n^{(e)} = \mu H_n^{(i)}$ , где  $H_n^{(e)}$  и  $H_n^{(i)}$  суть предельные значения  $H_n$  на поверхности *S* извне и изнутри магнетика соответственно [13]. Таким образом, должно выполняться:

$$\frac{H_n^{(e)}}{H_n^{(i)}} = \mu.$$
(56)

Проверка программы в отношении выполнения (56) проводилась для симметричного относительно плоскости z = 0 цилиндра с параметрами  $\mu = 19$ , радиус основания R = 2, высота l = 6, узлов квадратурной формулы m = 800.

Для боковой поверхности цилиндра S<sub>1</sub> нормальная составляющая совпадает с *r*-компонентой напряженности, поэтому (56) имеет вид:

$$\frac{H_r^{(e)}}{H_r^{(i)}} = \mu.$$
(57)

Для проверки (57) составляющая  $H_r^{(e)}$  вычислялась в точке с цилиндрическими координатами  $r = 2,01, \varphi = \pi/3, z = 2, a H_r^{(i)}$  — в точке  $r = 1,99, \varphi = \pi/3, z = 2$ . Полученное программой отношение компонент в (57) равно 18,86, то есть погрешность составила 0,7 %.

Для верхнего основания цилиндра S<sub>3</sub> нормальная составляющая совпадает с *z*-компонентой напряженности, поэтому (56) имеет вид

$$\frac{H_z^{(e)}}{H_z^{(i)}} = \mu.$$
(58)

Для проверки (58) составляющая  $H_z^{(e)}$  вычислялась в точке с цилиндрическими координатами  $r = 1,5, \varphi = \pi/3, z = 3,01, a$   $H_z^{(i)}$  — в точке  $r = 1,5, \varphi = \pi/3, z = 2,99$ . Полученное программой отношение компонент в (58) равно 18,66, то есть погрешность составила 1,8 %.

Проведенные проверки подтверждают справедливость предлагаемого алгоритма вычисления результирующей напряженности поля и его программной реализации. Отметим, что при сравнении эффективности работы описанной компьютерной программы с программой, реализующей алгоритм в работе [3], оказалось, что первая дает значительно более точные результаты за значительно более короткое время.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко сформулируем основные результаты, полученные в настоящей работе.

1. Приведен алгоритм нахождения напряженности результирующего магнитного поля внутри и вне однородного цилиндра конечных размеров, помещенного во внешнее магнитное поле произвольной конфигурации, сводящийся в основной его части к решению некоторого количества систем трех одномерных линейных интегральных уравнений. 2. Описаны подводные камни и способы решения возникающих проблем при составлении и программной реализации приведенного алгоритма дискретизации указанных систем уравнений. В частности, уравнения системы приведены к виду, в котором отсутствует изначальная сингулярность в ядрах интегральных операторов, выведены подходящие асимптотические формулы для вычисления функций Лежандра и выражений, содержащих такие функции и входящих в ядра интегральных операторов, что позволило повысить точность получаемых результатов и применимость описанного алгоритма для всего многообразия возможных геометрических параметров цилиндрического магнетика.

3. Приведены данные качественного и количественного тестирования результатов работы реализующей описанный алгоритм компьютерной программы, состоящего в проверке их соответствия физическим законам явления, а также в количественном сравнении этих результатов в предельных частных случаях с известными аналитическими ответами.

4. Проведено сравнение эффективности работы компьютерных программ, реализующих подход настоящей статьи и подход, описанный в нашей предыдущей работе [3]. Основные выводы такого сравнения следующие:

расчет с приемлемой точностью напряженности результирующего поля в рамках подхода настоящей статьи требует на стандартном бытовом персональном компьютере от нескольких секунд до 40 секунд (в зависимости от задаваемого числа разбиений в используемых квадратурных формулах), в то время как аналогичный расчет в рамках подхода [3] занимает от 5 до 10 мин;

расчет в рамках подхода настоящей статьи позволяет получать напряженность результирующего поля с хорошей точностью даже в точках непосредственной близости к границе магнетика, а расчет в рамках подхода [3] при приближении точки наблюдения к границе магнетика резко теряет в точности.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Квант» ("Quantum") № АААА-А18-118020190095-4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников А.Б. Теоретические основы магнитной дефектоскопии металлических тел. Томск: Изд-во ТГУ, 1980. 308 с.

2. Дякин В.В., Кудряшова О.В. Дефект в цилиндре // Дефектоскопия. 2012. № 4. С. 41—55.

3. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. К расчету поля конечного магнитного цилиндра // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 24—34.

4. Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskii V.Ya. One Approach to the Numerical Solution of the Basic Equation of Magnetostatics for a Finite Cylinder in an Arbitrary External Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 4. P. 291—302. [Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Один подход к численному решению основного уравнения магнитостатики для конечного цилиндра в произвольном внешнем поле // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 22 — 34.]

5. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. О проблемах использования пакетов универсальных программ для решения задач магнитостатики // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 23—34.

6. *Хижняк Н.А.* Интегральные уравнения макроскопической электродинамики. Киев: Наукова думка, 1986. 280 с.

7. Дякин В.В. Математические основы классической магнитостатики. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2016. 404 с.

8. *Friedman M.J.* Mathematical study of the nonlinear singular integral magnetic field equation. 1. // SIAM Journal Appl. Math. 1980. V. 39. № 1. P. 14—20.

9. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Т. 1. М.: Наука, 1973. 294 с.

10. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: Методы, алгоритмы, программы / Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1986. 544 с.

11. Градитейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, рядов, произведений. Санкт-Петербург: БВХ-Петербург, 2011. 1232 с.

12. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1989. 271 с.

13. *Ахиезер А.И*. Общая физика. Электрические и магнитные явления. Киев: Наукова думка, 1981. 471 с.

14. Неразрушающий контроль и диагностика / Под ред. В.В. Клюева М.: Машиностроение, 1995. 487 с.