



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 8

2023



ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 8
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

- В.А. Быченко, С.А. Хижняк, А.А. Сорокин, А.Г. Симоненко, И.В. Беркутов, И.Е. Алифанова, А.М. Шмаков, Е.И. Дьячковский.** Ультразвуковой контроль адгезии специальных покрытий 3
- Н.М. Иванов, Е.В. Кондаков, Ю.К. Милославский** Цифровая аппаратура и алгоритмы определения основных параметров пьезоэлектрических элементов в импульсном режиме возбуждения 11
- О.П. Богдан, О.В. Муравьева, А.В. Блинова, Д.В. Злобин.** Исследование плотности образцов из терморасширенного графита акустическим амплитудно-теневым методом 21
- Е.Г. Базулин.** Обнаружение эхосигналов от несплошностей за счет применения процедур сверхразрешения при контроле бетонных свай импакт-методом 32
- Сюнхуэй Цзоу, Вэйчэн Гао, Гозэн Лю.** Ультразвуковой контроль фазированными решетками низкоскоростных ударных повреждений в полимерах, армированных углеродным волокном 40

Электромагнитные методы

- Мохд Маварди Саари, Нурул А'ин Надзри, Мохд Ауфа Хади Путера Зайни, Мохд Херван Сулейман, Тошихико Кива.** Цилиндрический вихретоковый датчик с миниатюрными магнетометрами для контроля разнонаправленных прорезей в стальных изделиях 50
- По материалам XXXIV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»**
- С.Г. Сандомирский.** Повышение структурной чувствительности остаточной намагниченности и коэрцитивной силы сталей 62
- К.В. Гоголинский, А.С. Уманский, А.С. Голев.** Исследование возможности определения модуля упругости металлов методом динамического инструментального индентирования 65
- Л.В. Волкова, О.В. Муравьева, К.В. Колпаков.** Сравнительный анализ акустической анизотропии труб и листов с использованием SH- и tH-волн 68
- Е.Б. Желева, В.В. Семашко, А.А. Шавельев, О.А. Морозов, В.М. Кяшкин, А.А. Карабутов, Ю.П. Бродниковский.** Исследование совершенства структуры кристаллов LiCaAlF_6 методами лазерной акустики 71
- Информация 74

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ АДГЕЗИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2023 г. В.А. Быченко^{1,4,*}, С.А. Хижняк^{2,**}, А.А. Сорокин^{3,***}, А.Г. Симоненко³,
И.В. Беркутов^{1,4}, И.Е. Алифанова^{1,4}, А.М. Шмаков⁴, Е.И. Дьячковский⁴

¹Учреждение науки ИКЦ СЭКТ, Россия 197343 Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57

²ПАО «ОАК», Россия 125284 Москва, ул. Поликарпова, 23Б

³ОКБ им. А. Люльки, Россия 129301 Москва, ул. Касаткина, 13

⁴Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49

E-mail: *bychenok-vladimir@mail.ru; **elk@sukhoi.org; ***andrey.sorokin@okb.umpo.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023; после доработки 22.06.2023

Принята к публикации 30.06.2023

Контроль качества покрытий является актуальной задачей. Интерес вызывает не только обнаружение дефекта в покрытии в виде отслоения от подложки или расслоения между слоями многослойного покрытия, но и обнаружение места вероятного образования дефекта в виде участка с пониженной адгезией. Целью настоящей работы является обоснование возможности применения метода отраженного излучения (эхометода) акустического вида неразрушающего контроля с оптико-акустической генерацией акустических колебаний для оценки адгезии между слоями покрытия и между покрытием и подложкой. Задачей настоящей работы является установление корреляционной связи между акустическими характеристиками покрытий и прочности при отрыве покрытий. Актуальность работы подчеркивается отсутствием на сегодняшний день методов и средств неразрушающего контроля адгезии покрытий с доказанной эффективностью и достоверностью. Для достижения поставленной цели были разработаны и изготовлены образцы покрытия с заложенными искусственными дефектами. Была установлена корреляция между акустическими характеристиками покрытия и прочностью при отрыве покрытия, подтвержденная в результате механических испытаний, что подчеркивает научную новизну проводимых исследований.

Ключевые слова: лазерно-ультразвуковой контроль, контроль адгезии, эхометод, оптико-акустическая генерация, неразрушающий контроль, покрытия.

DOI: 10.31857/S0130308223080018, **EDN:** DYGDZP

ВВЕДЕНИЕ

Специальные покрытия (СП) представляют собой многослойные покрытия из композиционного материала, наполненного функциональными частицами различных составов и морфологии [1—4].

При нанесении СП на поверхность изделий в результате длительной эксплуатации, хранения, температурного, механического, радиационного и светового воздействий физико-механические свойства СП могут деградировать, также возможно образование дефектов следующих типов:

- отклонение толщины СП или отдельного слоя многослойного СП от требуемого;
- расслоение или снижение адгезии между СП и подложкой;
- расслоение или снижение адгезии между слоями СП [5—8].

Образовавшиеся дефекты СП в процессе эксплуатации могут развиваться и привести к разрушению СП. Таким образом, неразрушающий контроль качества СП является важным и ответственным этапом при их изготовлении и эксплуатации.

Для обнаружения расслоений между СП и подложкой и между слоями СП используются акустический [9—11], тепловой [12, 13], электромагнитный [14] и другие виды контроля. Данные виды контроля эффективны в тех случаях, когда дефект характеризуется изменением плотности, электропроводности и других физико-механических свойств (инородные включения, расслоения, наличие вздутия, воздушного пузыря).

Однако к СП кроме отсутствия дефектов предъявляются также требования к прочности при отрыве, которая должна составлять не менее 2 МПа. В настоящий момент ведутся экспериментальные исследования по разработке методик и технологий контроля адгезии покрытий [20—22], но методики с подтвержденной эффективностью и достоверностью результатов оценки адгезии на сегодняшний момент отсутствуют, что подтверждает актуальность проводимых исследований.

Авторами настоящей статьи предложено использовать акустический вид неразрушающего контроля, ультразвуковой эхометод с оптико-акустической генерацией акустических колебаний, реализованный в лазерно-ультразвуковом дефектоскопе и оптико-акустическом преобразователе (ОАП) [23—25].

Преимущества ультразвукового эхометода контроля с оптико-акустической генерацией акустических колебаний заключаются в следующем: благодаря широкополосности и малой длительности (70—80 нс) термооптически возбуждаемых акустических импульсов достигается наибольшая точность измерения скорости ультразвука (относительная погрешность не более 1 %, повторяемость 1—2 м/с) [24—26].

Целью настоящих исследований является оценка применимости ультразвукового эхометода с оптико-акустической генерацией акустических колебаний для контроля адгезии между СП и подложкой и между слоями СП.

Задачей исследований является установление корреляционной зависимости между измеряемыми параметрами акустических характеристик покрытий и адгезией между слоями СП и между СП и подложкой, подтверждаемой в результате механических испытаний.

СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны и изготовлены образцы размером 50×50 мм с двуслойным СП на металлической подложке толщиной 3 мм (рис. 1а). СП1 и СП2 отличаются по физическим и акустическим свойствам. Покрытие СП2 также является многослойным и наносится на изделие послойно после полимеризации предыдущего слоя, что позволяет между слоями СП2 моделировать нарушение технологии изготовления, которое должно привести к снижению прочности на отрыв между слоями СП2.

Скорость продольных ультразвуковых волн в СП1 и СП2 составляет 970 и 850 м/с соответственно. Отношение полезный сигнал/шум в бездефектном образце — 36 дБ.

В образцах моделировались эксплуатационное воздействие и нарушение технологии изготовления следующими способами:

- температурное воздействие на образец (образец № 2);
- отсутствие подготовки поверхности подложки (образец № 3, рис. 1б);
- пониженное содержание отвердителя в заданных проходах СП2 (образцы № 4, 5, 6, рис. 1в);
- отсутствие отвердителя в заданных проходах СП2 (образец № 7, см. рис. 1в).

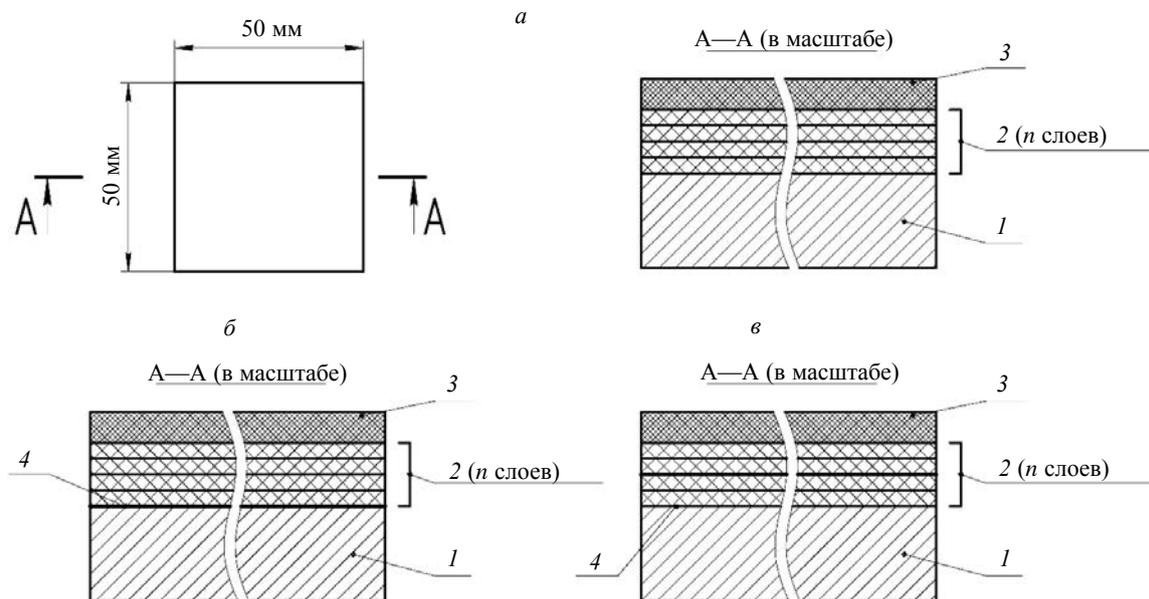


Рис. 1. Эскизы образцов: № 1 (бездефектного) и № 2 (а); № 3 (б); № 4—№ 7 (в).
1 — подложка из титанового сплава; 2 — слой СП2; 3 — слой СП1; 4 — расположение дефекта.

Для исследований акустических свойств образцов Учреждением науки ИКЦ СЭКТ [28] был разработан комплект средств ультразвукового контроля с оптико-акустической генерацией акустических

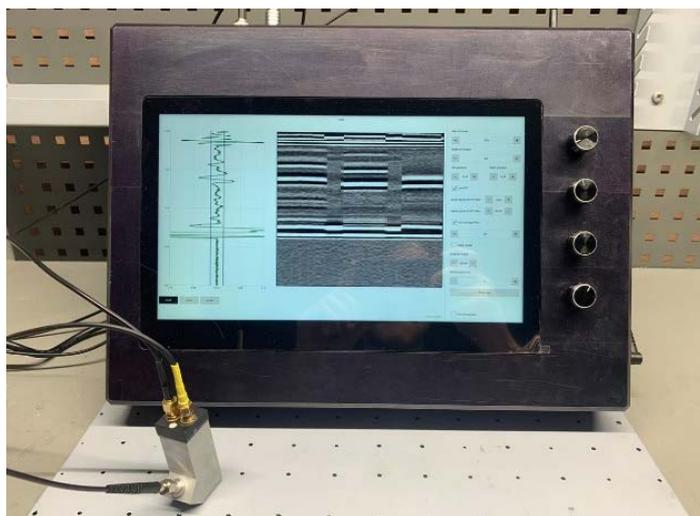


Рис. 2. Комплект средств ультразвукового контроля с оптико-акустической генерацией акустических колебаний.

колебаний: опытный образец лазерно-ультразвукового дефектоскопа и ОАП П111-ОГ (рис. 2). Принцип действия средств контроля заключается в следующем: наносекундный импульс лазера с диодной накачкой лазерно-ультразвукового дефектоскопа с помощью оптоволокна направляется на генератор ОАП, в котором возбуждается субмикросекундный акустический импульс, который направляется в исследуемый образец. Рассеянные и отраженные волны регистрируются широкополосным пьезоприемником ОАП с рабочей полосой частот от 0,2 до 12 МГц. Опытный образец лазерно-ультразвукового дефектоскопа предназначен для использования в производственных условиях, изготовлен в моноблочном исполнении и отличается от аналогов мобильностью. Обеспечивает измерение амплитуд эхосигналов с допускаемой абсолютной погрешностью ± 2 дБ, а также измерение временных интервалов с допускаемой абсолютной погрешностью ± 12 нс.

ОАП разработан для неразрушающего контроля тонких покрытий с малой скоростью распространения ультразвуковых волн (до 1000 м/с) и высокой степенью затухания ультразвуковых колебаний. С помощью комплекта средств ультразвукового контроля на образцах были записаны А- и В-сканы и измерены амплитуды и время прихода зарегистрированных эхосигналов.

Механические испытания проводились после исследований акустических характеристик СП.

При подготовке к механическим испытаниям к образцу с помощью клея на основе эпоксидных смол со стороны СП и со стороны подложки были приклеены цилиндрические захваты диаметром 35 мм. Соосность захватов и качество склейки обеспечивалось с помощью оснастки (рис. 3а). После приклейки захватов с помощью кольцевой фрезы подрезалось СП по кромке захвата (рис. 3б).



Рис. 3. Подготовка образца к проведению механических испытаний: приклеивание захватов с использованием оснастки (а); подрезка покрытия по кромке захвата (б).



Рис. 4. Общий вид образца в зажимном устройстве разрывной машины.

Для проведения механических испытаний использовалась испытательная машина LFM150 (рис. 4). Растяжение образца осуществлялось со скоростью перемещения захватов 50 мм/мин до полного разрушения. При этом регистрировалась нагрузка (Н) и перемещение захватов в мм. В качестве характеристики адгезии между слоями СП и между СП и подложкой принимается прочность при отрыве [27].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

При проведении исследований ультразвуковым методом с оптико-акустической генерацией акустических колебаний были получены А- и В-сканы, на которых различимы следующие типы сигналов (рис. 5а): 1 — зондирующий сигнал; 2 — эхосигнал от границы раздела между слоями СП1 и СП2; 3 — эхосигнал от границы раздела между СП2 и подложкой; 4 — донный сигнал от подложки; 5 — эхосигнал от дефекта или шумы.

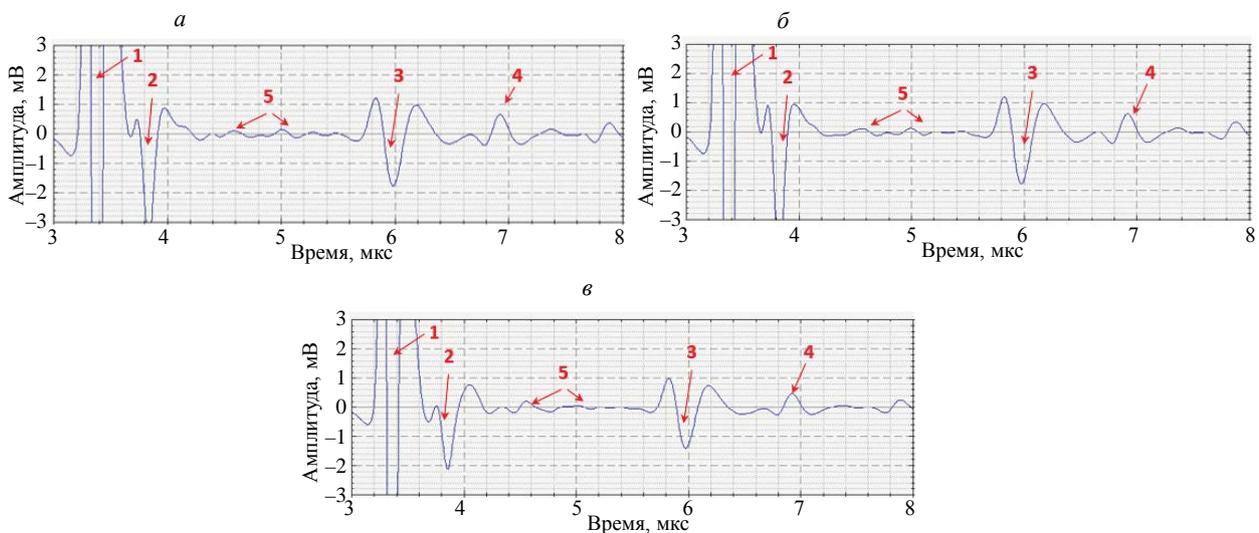


Рис. 5. А-сканы, полученные на: бездефектном образце № 1 (а); на образце № 2 после температурного воздействия (б); на образце № 3 без обработки поверхности подложки (в).

На рис. 5а приведен А-скан, полученный на бездефектном образце № 1.

На рис. 5б приведен А-скан образца № 2 после температурного воздействия. В результате температурного воздействия акустические характеристики СП не изменились.

При отсутствии подготовки поверхности подложки (образец № 3) наблюдается увеличение акустических шумов 5 по амплитуде (рис. 5в). Изменение параметров распространения других эхосигналов не наблюдается.

При наличии в СП2 проходов с пониженным содержанием отвердителя (образцы № 4, 5, 6) на А-скане наблюдается рост шумовой составляющей сигнала (рис. 6). Однако определить точную глубину расположения дефекта затруднительно.

При наличии в СП2 проходов без отвердителя (образец № 7) наблюдается эхосигнал 5 положительной фазы на глубине, соответствующей глубине заложения дефекта по конструкторской документации (рис. 6з).

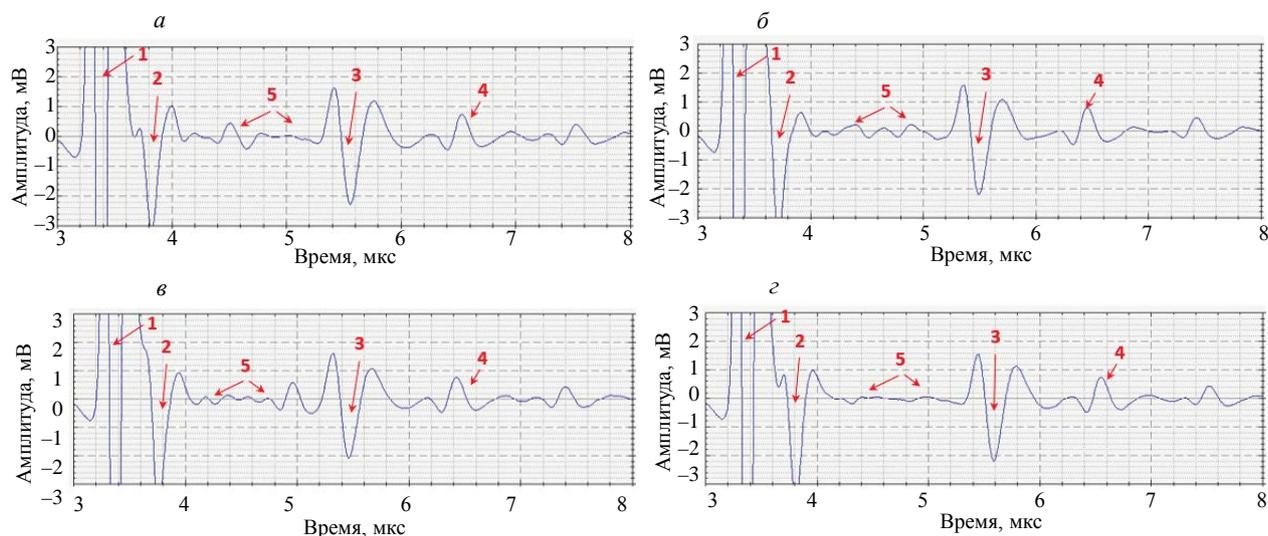


Рис. 6. А-сканы, полученные на образцах с пониженным содержанием отвердителя в проходах СП2: образец № 4 (а); образец № 5 (б); образец № 6 (в); образец № 7 (з).

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

В табл. 1 приведены полученные в результате испытаний значения усилия отрыва между СП2 и подложкой / между слоями СП2. В зависимости от типа заложенного дефекта можно выделить 3 характера разрушения (рис. 7): по СП — рваное в бездефектном случае; по подложке — гладкое при необработанной поверхности подложки; по покрытию — гладкое при нарушении технологии нанесения СП.

Таблица 1

Значения критериев $K_{СП}$ и прочности при отрыве между слоями СП2 и СП2 и подложкой

№ образца	Тип образца (вид заложенного дефекта)	Прочность при отрыве, МПа	$K_{СП}$
1	Бездефектный	3,6	13,0
2	Бездефектный (после температурного воздействия)	3,7	13,5
3	Дефектный (без подготовки поверхности подложки)	2,7	9,1
4	Дефектный (между слоями проходы с пониженным содержанием отвердителя)	1,2	6,0
5	Дефектный (между слоями проходы с пониженным содержанием отвердителя)	1,0	5,4
6	Дефектный (между слоями проходы с пониженным содержанием отвердителя)	1,1	5,4
7	Дефектный (между слоями проходы без отвердителя)	1,0	6,8

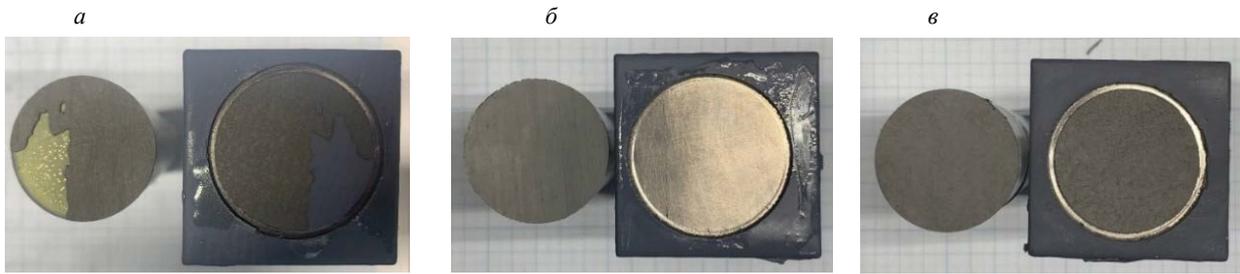


Рис. 7. Характер разрушения образцов: по покрытию — рваное (а); по подложке — гладкое (б); по покрытию — гладкое (в).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате проведенных экспериментальных исследований ультразвуковым методом с оптико-акустической генерацией акустических колебаний в качестве признаков пониженной адгезии между слоями СП2 и между СП2 и подложкой приняты:

- наличие эхосигналов положительной или отрицательной фазы 5 между эхосигналом 2 (от границы раздела между слоями СП2) и эхосигналом 3 (от границы раздела между подложкой и СП2);
- наличие акустических шумов 5.

При увеличении толщины (количества слоев) СП также может расти уровень акустических шумов 5, что связано с увеличением количества границ раздела сред. В то же время при некачественном акустическом контакте между преобразователем и поверхностью СП уменьшаются регистрируемые амплитуды всех эхосигналов, в том числе акустических шумов. На основе этих соображений для оценки адгезии между слоями СП2 и между СП2 и подложкой предложено использовать коэффициент, позволяющий давать комплексную оценку акустических характеристик СП с учетом толщины покрытий и качества акустического контакта:

$$K_{СП} = -\ln \left| \frac{\max(|A_5^+|, |A_5^-|)}{-A_1^-} \right| \cdot \frac{t_3 - t_1}{t_5 - t_1},$$

где A_5^+ — амплитуда положительной фазы эхосигнала от дефекта в СП или шумовой составляющей; A_5^- — амплитуда отрицательной фазы эхосигнала от дефекта в СП или шумовой составляющей; t_5 — время прихода эхосигнала от дефекта в СП или шумовой составляющей; A_1^- , t_1 — амплитуда и время прихода зондирующего сигнала (характеризует качество акустического контакта, толщину слоя иммерсионной жидкости и задержку самого ОАП); t_3 — время прихода эхосигнала от границы раздела между СП и подложкой.

В формуле выражение $(t_3 - t_1)$ характеризует общую толщину двухслойного СП; выражение $(t_5 - t_1)$ характеризует глубину расположения отражателя (дефекта) в СП; натуральный логарифм \ln учитывает экспоненциальное затухание акустических колебаний в СП. Таким образом, предложенная формула характеризует рост шумовой составляющей сигнала (амплитуды сигналов A_5^+ , A_5^-) с учетом толщины покрытия (разность времен прихода эхосигналов $(t_3 - t_1)$) и поправкой на качество акустического сигнала (амплитуда зондирующего сигнала A_1^-). При этом затухание и скорость распространения ультразвуковых колебаний в отдельных слоях СП1 и СП2 не оцениваются, а учитываются их интегральные значения для СП в целом.

В табл. 1 приведены результаты оценки $K_{СП}$ и значения прочности при отрыве, определенные в результате механических испытаний.

Результаты механических испытаний подтвердили результаты, полученные с помощью ультразвукового метода с оптико-акустической генерацией акустических импульсов:

- температурное воздействие без деструкции материала не приводит к снижению адгезии между СП2 и подложкой и между слоями СП;
- отсутствие подготовки поверхности подложки приводит к снижению адгезии между СП2 и подложкой;
- пониженное содержание и отсутствие отвердителя в слоях СП2 существенно снижает уровень адгезии между слоями СП2.

Установлено, что при:

$0 < K_{СП} \leq 8$, прочность при отрыве составляет менее 2 МПа;

$8 < K_{СП} \leq 16$, прочность при отрыве составляет более 2 МПа.

Коэффициент парной корреляции по шкале Чеддока между прочностью при отрыве образцов и коэффициентом $K_{СП}$ (см. табл. 1) составил 0,96, что свидетельствует о весьма высокой (сильной) связи между исследуемыми параметрами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для контроля качества СП предложено использовать ультразвуковой эхометод акустического вида контроля с оптико-акустической генерацией акустических колебаний. При проведении экспериментальных исследований установлено, что выбранный метод обеспечивает выявление нарушения адгезии между слоями СП2, СП2 и подложкой. При этом информативными параметрами служат время прихода и амплитуда эхосигналов от границы раздела между СП2 и подложкой и акустические шумы в СП2. На основе информативных параметров разработан критерий качества СП — $K_{СП}$. Наличие взаимосвязи между $K_{СП}$ и прочностью при отрыве доказано в результате проведения механических испытаний.

Для правильной интерпретации результатов ультразвукового контроля необходимо иметь априорную информацию о:

- количестве слоев в СП на изделии;
- скорости распространения ультразвуковых колебаний в бездефектном образце СП;
- материале и толщине подложки.

Для разработки методики контроля адгезии необходимо:

- уточнить подходы к моделированию пониженной адгезии между слоями СП и СП и подложкой;
- набрать статистически значимый объем экспериментальных данных с целью уточнения полученной корреляционной зависимости;
- разработать настроечные образцы для контроля адгезии;
- доработать средства ультразвукового контроля с оптико-акустической генерацией акустических колебаний для применения в производственных условиях;
- разработать алгоритмическое обеспечение для анализа результатов контроля и вычисления критерия качества СП в процессе контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манин В.А. Совершенствование радиоволновых способов обнаружения дефектов в радиопоглощающих покрытиях на основе математического моделирования // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2016. № 4 (40). С. 123—135.
2. Краев И.Д., Образцова Е.П., Юрков Г.Ю. Влияние морфологии магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S2. С. 10—14.
3. Воронин И.В., Горбатов С.А., Науменко В.Ю., Петрунин В.Ф. Многослойные радиопоглощающие нанокomпозиционные материалы и покрытия // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 4. С. 5—10.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520—530.
5. Круглянский И.М., Алексеенко А.А. Классификатор методов и средств неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов // Научные труды МАТИ им. К.Э. Циолковского. 2003. Вып. 6 (78). С. 222—226.
6. Мурашов В.В. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. С. 23—32.
7. Манин В.А., Казьмин А.И., Федюнин П.А., Тренин Н.А. СВЧ-способ обнаружения и оценки дефекта типа «Отслоение» в защитных покрытиях вооружения, военной и специальной техники и устройств его реализации // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. № 1. С. 145—152.
8. Федоров Н.П., Дмитриев Д.А. К вопросу комплексного контроля защитных покрытий авиационной техники // Вестник российских университетов. Математика. 2005. № 2. С. 157—161.
9. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / 2-е изд., переработка и доп. СПб.: Издательство «СВЕН», 2007. 296 с.

10. *Мурашов В.В.* Неразрушающий контроль клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. № 7. С. 21—28.
11. *Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юрсенсон С.А.* Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПКМ // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. Выпуск № 49. С. 40—49.
12. *Федоров А.В., Котовицков И.О.* Экспериментальная апробация средств и методики активного теплового контроля вертолетных лопастей из композиционных материалов // Приборы. 2022. № 9 (267). С. 1—7.
13. *Корнилов Г.А.* Методика ИК-термографии выявления скрытого дефекта в авиационной конструкции из полимерных композиционных материалов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2022. № 1. С. 41—48.
14. *Сясько В.А.* Электромагнитные методы и приборы контроля и мониторинга толщины покрытий и стенок изделий.
15. *Rui Li, Qipeng Xiao, Ping-a Yang, Hao Wang, Lin Liu.* Magnet-induced deformation enhanced adhesion based on magneto-responsive polymer: Theoretical analysis and experimental verification // *Materials & Design*. 2020. V. 194. P. 108905.
16. *Krahn J., Bovero E., Menon C.* Magnetic field switchable dry adhesives // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2015. V. 7. Is. 4. P. 2214—2222.
17. *Pang H.M., Pei L., Xu J.Q., Cao S.S., Wang Y., Gong X.L.* Magnetically tunable adhesion of composite pads with magnetorheological polymer gel cores // *Composites Science and Technology*. 2020. V. 192. P. 108115.
18. *Tatari M., Mohammadi N.A., Turner K.T., Shan W.L.* Dynamically tunable dry adhesion via subsurface stiffness modulation // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. V. 5. Is. 18. P. 1800321.
19. *Lee H., Um D.S., Lee Y.S., Lim S.D., Kim H.J., Ko H.H.* Octopus-inspired smart adhesive pads for transfer printing of semiconducting nanomembranes // *Advanced Materials*. 2018. V. 28. Is. 34. P. 7457—7465.
20. *Vital-Juarez A., Roffi L., Desmarres J.-M., Devos A.* Picosecond acoustics versus tape adhesion test: Confrontation on a series of similar samples with a variable adhesion // *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 448. P. 128926. ISSN 0257-8972.
21. *Chen Xiaomei, Shaw Christopher, Gelman Len, Grattan Kenneth T.V.* Advances in test and measurement of the interface adhesion and bond strengths in coating-substrate systems, emphasising blister and bulk techniques // *Measurement*. 2019. V. 139. P. 387—402. ISSN 0263-2241.
22. *Hatic Damjan, Cheng Xiaoyin, Stephani Thomas, Rauhut Markus, Gäbler Jan, Bethke Reinhold, King Hunter, Hagen Hans.* Use of machine learning for automatic Rockwell adhesion test classification based on descriptive and quantitative features // *Surface and Coatings Technology*. 2021. V. 427. P. 127762. ISSN 0257-8972.
23. Неразрушающий контроль. Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 2: Электрический контроль / К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий. М.: Машиностроение, 2004. 679 с.
24. Патент 2381496 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Лазерно-ультразвуковой дефектоскоп / А.А. Карабутов. Патентообладатель: А.А. Карабутов. Заявка: 2381496, 29.05.2008. Опубл.: 10.02.2010.
25. Патент 2 653 123 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Способ импульсно-периодического лазерно-ультразвукового контроля твердых материалов и устройство для его осуществления / А.А. Карабутов, Е.Б. Черепецкая, А.С. Бычков, Е.А. Миронова, Н.А. Морозов, П.Н. Иванов, И.А. Шибаев, И.Е. Сас, В.П. Зарубин. Патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Заявка: 2017123111, 30.06.2017. Опубл.: 07.05.2018.
26. *Быченко В.А., Кинжагулов И.Ю., Беркутов И.В., Марусин М.П., Алифанова И.Е.* Применение лазерно-ультразвукового генератора для определения напряженно-деформированного состояния специальных материалов и изделий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2013. № 4 (86). С. 107—114.
27. ГОСТ 32299—2013 Межгосударственный стандарт. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва.

ЦИФРОВАЯ АППАРАТУРА И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

© 2023 г. Н.М. Иванов^{1,*}, Е.В. Кондаков^{1,**}, Ю.К. Милославский¹

¹Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор»
Южного федерального университета, Россия 344090 Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10
E-mail: *qkivanov@list.ru; **evg_kv@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2023; после доработки 14.06.2023
Принята к публикации 27.06.2023

Предложен метод измерения спектра комплексной проводимости пьезоэлектрических элементов в импульсном режиме возбуждения и его цифровая реализация. Метод обеспечивает сокращение длительности измерений, а алгоритм обработки — повышение точности оцениваемых параметров. Для определения характеристических частот, добротности и параллельной емкости используется алгоритм дробно-рациональной аппроксимации частотной зависимости комплексной проводимости в резонансном промежутке частот.

Ключевые слова: пьезоэлектрический элемент, комплексный спектр проводимости, характеристические частоты, дробно-рациональная аппроксимация.

DOI: 10.31857/S013030822308002X, EDN: DYMELK

ВВЕДЕНИЕ

Определение основных физических параметров пьезоэлектрических материалов (диэлектрических, упругих, электромеханических) составляет неотъемлемую часть исследований, направленных на создание новых материалов, а также производственных испытаний пьезоэлектрических элементов (ПЭ) после изготовления и/или перед их использованием в изделиях пьезотехники.

Электрическая емкость и тангенс угла диэлектрических потерь ПЭ измеряются на низкой (обычно 1 кГц) частоте при приложении к его электродам гармонического напряжения. Для этого используются мостовые схемы. Измеренное значение электрической емкости ПЭ входит в формулу для расчета одной из компонент тензора диэлектрической проницаемости. Для определения таких параметров пьезоэлектрического материала, как компоненты тензора пьезомодуля и скорость звука, обычно следуют единственному действующему в настоящее время руководящему документу ОСТ II 0444—87 [1], который предписывает использование классического метода «резонанс—антирезонанс». Метод предполагает определение характеристических частот последовательного и параллельного резонансов основной, т.е. низкочастотной, моды колебаний, хорошо изолированной от высших гармоник. Измерения проводятся для образцов ПЭ определенных размеров и формы. По найденным характеристическим частотам и по результатам измерений на низкой частоте определяются относительная диэлектрическая проницаемость, скорость звука, пьезомодуль d_{31} или d_{33} , а также эффективный коэффициент электромеханической связи. Реализация этого метода, согласно [1], заключается в измерении частотной зависимости амплитуды тока через ПЭ, которая при неизменной амплитуде возбуждающего напряжения пропорциональна модулю проводимости. Характеристические частоты ПЭ в этой реализации отождествляются с частотами максимума и минимума модуля проводимости ПЭ. Таким образом, фактически определяется модуль комплексного спектра проводимости, но используются всего две точки этого спектра. Преимуществом такой реализации является простота амплитудных измерений, за что приходится расплачиваться низкой точностью результатов (достаточно высокими случайной и систематической погрешностями), а также низкой скоростью измерений. В [2, 3] приведены расчетные формулы и описания автоматизированных установок, использующий описанный подход.

Полная информация о механической колебательной системе ПЭ и его электрических свойствах, при измерениях с электрической стороны содержится в комплексном спектре, т.е. в частотной зависимости комплексной проводимости $Y(f)$, где f — частота. Для извлечения этой информации необходимо, во-первых, измерять не амплитудный, а комплексный спектр $Y(f)$ в области частот, охватывающей резонансный промежуток, включающий частоты резонанса и антирезонанса. Во-вторых, для получения характеристических частот необходимо выполнять интерпретацию всего измеренного спектра, например, методом круговых диаграмм [4] с подгонкой параметров модели.

Пример реализации такого подхода содержится в [5, 6]. Метод круговых диаграмм применим для ПЭ, обладающих как достаточно высокой механической добротностью, так и высоким значением коэффициента электромеханической связи. В [7] предложена подгонка действительной части проводимости, что позволяет определить несмещенную частоту последовательного резонанса, но частота параллельного резонанса по-прежнему отождествляется с минимумом модуля проводимости, сохраняя ее систематическую ошибку.

Реализация [8] основана на измерении трех амплитуд напряжений: на образце, последовательно соединенном с ним резисторе и суммарного напряжения на всей цепочке. Фазовая информация извлекается из решения треугольника, образованного векторным представлением этих напряжений. Ценой дополнительных погрешностей такой подход позволяет измерить комплексную проводимость с помощью единственного последовательно переключаемого вольтметра.

В большинстве случаев частотная характеристика комплексной проводимости $Y(f)$ измеряется амплитудно-фазовым способом [4]. При этом гармонический сигнал $u_0(t) = A_0(f)\cos(2\pi ft + \varphi_0(f))$ с частотой f и известной амплитудой $A_0(f)$ с выхода генератора синусоидальных сигналов подается на последовательно соединенные ПЭ и резистор с известным сопротивлением r_0 . Для напряжения на этом резисторе $u(t) = A_1(f)\cos(2\pi ft + \varphi_1(f))$ измеряются как амплитуда $A_1(f)$, так и разность фаз $\varphi(f) = \varphi_0(f) - \varphi_1(f)$. Измерения проводятся на каждой отдельно устанавливаемой частоте f , контролируемой частотомером. Значение комплексной проводимости на частоте f вычисляется по формуле [7, 9]:

$$Y(f) = \frac{1}{r_0} \left(\frac{A_0(f)}{A_1(f)} \exp(i\varphi(f)) - 1 \right),$$

где i — мнимая единица. Номинал нагрузочного сопротивления r_0 выбирается таким образом, чтобы напряжение на нем не превышало одной десятой возбуждающего напряжения A_0 , т.е. $r_0 \approx |10 \cdot Y(f)|^{-1}$. Поскольку в области частот, полностью охватывающей резонансный промежуток ПЭ, модуль его импеданса может меняться в широких пределах (до шести порядков [10]), соблюсти это условие, как правило, невозможно. Поэтому при смене частоты может потребоваться изменение величины r_0 (смена предела измерения).

Амплитудно-фазовый способ измерений обычно реализуется стандартными *RLC*-метрами (анализаторами импеданса). В настоящее время повсеместная доступность таких измерительных приборов и ЭВМ для быстрой интерпретации комплексных спектров позволяет полностью отказаться от амплитудной реализации метода «резонанс—антирезонанс», признав ее устаревшей.

Измерение спектра на отдельных частотах с использованием квазигармонических возбуждающих сигналов требует значительного времени, например, в реализации [11] оно составляет более 95 % от полного времени определения параметров образца. Это обусловлено следующими физическими причинами. Для адекватного определения спектра в резонансном промежутке требуется достаточное число частотных точек n . Увеличение n полезно для уменьшения случайной компоненты ошибки за счет усреднения дополнительных измерений. Это особенно важно при измерениях в окрестности антирезонанса образцов с малой емкостью, обладающих высоким импедансом, и, как следствие, повышенной чувствительностью к внешним наводкам и помехам — источникам дополнительной случайной погрешности. Время измерения τ каждой частотной позиции должно быть больше времени установления стационарных колебаний образца: $\tau \sim Q/f_r$, где Q — добротность ПЭ, f_r — частота резонанса. Таким образом, увеличение числа точек приводит к увеличению времени измерения всего спектра $T = n\tau$. К значению τ следует добавить время, необходимое анализатору импеданса на перестройку частоты и измерение амплитуды и фазы, включая автоматический выбор предела измерения. Поэтому время измерения в целом может оказаться неприемлемым в условиях промышленного контроля ПЭ.

БЫСТРОЕ ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

Преодолеть указанные недостатки позволяет использование цифровых методов возбуждения, регистрации и обработки измерительного сигнала ПЭ [7, 9]. Основная идея предлагаемого метода заключается в отказе от последовательного возбуждения образца отрезками гармонического сигнала в пользу одиночного импульса, содержащего весь спектр актуальных частот. В таком случае длительность всего измерения соответствует длительности одного импульса $T \sim \tau \sim Q/f_r$, а разделение спектральных компонент достигается в цифровом виде дискретным преобразованием Фурье. Отсутствие зависимости общего времени T от числа измеряемых точек спектра n по-

звояет получить значительный выигрыш по времени измерения и, что немаловажно, избавляет от непростого компромисса между скоростью измерений и снижением случайных погрешностей. Разумеется, такой «одновременный» способ измерения всех компонент спектра, опирающийся на принцип суперпозиции, применим только для линейных образцов, но на практике они составляют абсолютное большинство.

Структурная схема цифровой аппаратуры для измерения частотной характеристики комплексной проводимости представлена на рис. 1.

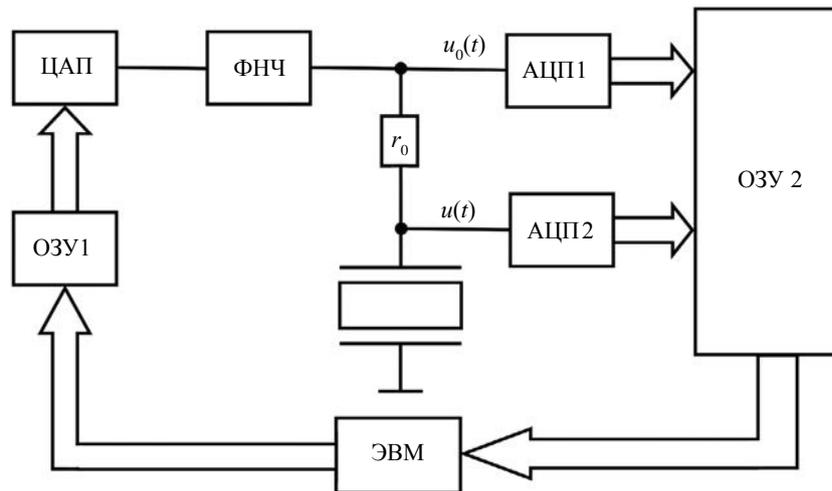


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры для измерения частотной характеристики комплексной проводимости.

Аппаратура содержит ЭВМ, буферное запоминающее устройство (ОЗУ1), соединенное с ЭВМ, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), восстанавливающий фильтр нижних частот (ФНЧ), измерительный четырехполюсник, состоящий из последовательно соединенных резистора и ПЭ, двухканальный аналогоцифровой преобразователь (АЦП1 и АЦП2) и буферное запоминающее устройство (ОЗУ2), соединенное с ЭВМ. Аналоговая обработка сигналов сведена к операциям фильтрации и усиления, которые составляют необходимый минимум.

Роль генератора сигналов выполняет связка «ЭВМ—ОЗУ1—ЦАП—ФНЧ». Информация о частоте, амплитуде и фазе сигналов выделяется из цифровых сигналов АЦП1 и АЦП2 путем их обработки в ЭВМ. Для повышения точности измерений используются АЦП с достаточно широким (более 70 дБ) динамическим диапазоном. Цифровой измерительный сигнал, формируемый в ЭВМ, произволен и выбирается из соображений удобства и эффективности измерений. Для определения электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь используется гармонический сигнал. Для измерений в полосе частот используется импульсный сигнал.

Рассмотрим особенности измерения спектра проводимости при импульсном возбуждении ПЭ [12]. Фурье-образы $u_0(f)$ и $u(f)$ напряжений $u_0(t)$ и $u(t)$ связаны соотношением:

$$u(f) = K(f)u_0(f), \quad (1)$$

а комплексный коэффициент передачи измерительного четырехполюсника $K(f)$ определяется выражением:

$$K(f) = \frac{1}{r_0 Y(f) + 1}.$$

Во временной области соотношению (1) соответствует свертка напряжений $u_0(t)$ и $u(t)$:

$$u(t) = \int_{-\infty}^t H(t-t')u_0(t')dt',$$

где импульсная характеристика измерительного четырехполюсника $H(t)$ есть обратное преобразование Фурье $K(f)$:

$$H(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi ift} K(f) df.$$

При импульсном возбуждении $u_0(t) = U_0(t)(\theta(t) - \theta(t - T_1))$, где $U_0(t)$ — напряжение в импульсе; $\theta(t)$ — ступенчатая функция Хэвисайда, равная нулю при $t < 0$ и единице при $t > 0$; T_1 — длительность импульсного сигнала. Тогда при $t \in [0, T_1]$ напряжение

$$u_B(t) = \int_0^t H(t-t')U_0(t')dt'$$

соответствует вынужденным колебаниям ПЭ, а при $t > T_1$ напряжение

$$u_C(t) = \int_0^{T_1} H(t-t')U_0(t')dt'$$

соответствует свободным затухающим колебаниям ПЭ после прекращения возбуждающего воздействия. Для корректного определения спектра $Y(f)$ по формуле:

$$Y(f) = \frac{1}{r_0} \left(\frac{u_0(f)}{u_1(f)} - 1 \right) \quad (2)$$

необходима регистрация как напряжения $u_B(t)$, так и напряжения $u_C(t)$ с последующим переходом в частотную область путем выполнения преобразования Фурье, для чего общее время измерения $T_0 = T_1 + \tau_1$ должно превосходить время возбуждения T_1 на величину τ_1 , которая фактически является временем затухания свободных колебаний и определяется добротностью ПЭ.

Импульсный сигнал удобно выбрать так, чтобы форма его амплитудного спектра была близка к прямоугольной. Последнему условию удовлетворяет сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Формирование N значений цифрового сигнала возбуждения с ЛЧМ s_n амплитуды A , $n \in [0, N-1]$, спектр которого локализован в заданной полосе $[f_0, f_1]$, где f_0 и f_1 — минимальная и максимальная циклические частоты диапазона, выполняется в ЭВМ по формуле:

$$s_n = A \sin \left(2\pi n \Delta t \left(f_0 + \frac{f_1 - f_0}{2T_1} n \Delta t \right) \right) (\theta(n \Delta t) - \theta(n \Delta t - T_1)). \quad (3)$$

Здесь Δt — период дискретизации; $T_0 = (N-1)\Delta t$ — длительность измерений; $T_1 = T_0 - \tau_1$ — длительность импульсного сигнала с ЛЧМ; τ_1 — длительность паузы между окончанием возбуждающего импульсного сигнала и моментом окончания регистрации цифровых сигналов.

Таким образом, напряжение приложено к ПЭ на интервале времени длительностью T_1 , в течение которого мгновенная частота сигнала изменяется от f_0 до f_1 . В этот период времени ПЭ совершает вынужденные колебания. Время измерений T_0 превосходит T_1 на длительность паузы τ_1 , в течение которой регистрируется сигнал собственных колебаний ПЭ после прекращения подачи возбуждающего напряжения. Длительность паузы τ_1 подбирается для каждого типа ПЭ индивидуально и обычно составляет 5—10 % от T_1 .

С помощью цифроаналогового преобразователя и фильтра нижних частот отсчеты цифрового сигнала s_n преобразуются в аналоговый сигнал возбуждения $u_0(t)$ длительностью T_0 . Аналоговый сигнал возбуждения $u_0(t)$ подается на измерительный четырехполюсник, а измерительное напряжение $u(t)$ регистрируется в точке соединения резистора и ПЭ. В двухканальном АЦП сигнал возбуждения $u_0(t)$ и измерительный сигнал $u(t)$ синхронно преобразуются в цифровую форму и накапливаются в буферном ОЗУ2, откуда поступают в ЭВМ, где подвергаются дискретному преобразованию Фурье (ДПФ) с использованием алгоритма БПФ. В результате определяются комплексные дискретные спектры цифровых сигналов $U_0(f_n)$ и $U(f_n)$, $f_n = n/T_0$, $n \in [0, N/2]$. Значения комплексной проводимости $Y(f_j)$ ПЭ на каждой дискретной частоте $f_j = j/T_0$, попадающей в полосу частот возбуждающего сигнала, т.е. такой, что $f_j \in [f_0, f_1]$, вычисляются по формуле, идентичной (2):

$$Y(f_j) = \frac{1}{r_0} \left(\frac{U_0(f_j)}{U_1(f_j)} - 1 \right). \quad (4)$$

Период дискретизации Δt , а с ним и частота дискретизации $F_d = 1/\Delta t$, выбираются как обычно, так, чтобы выполнялось неравенство $F_d > 2f_1$.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При $f_0 = f_1$ сигнал вида (3) вырождается в радиоимпульс. Такой сигнал используется для измерения электрической емкости C_T и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ свободного ПЭ. При той же схеме обработки (два ДПФ) проводимость вычисляется по формуле (4) на одной частоте f_0 , а емкость и тангенс вычисляются по формулам:

$$C_T = \text{Im} Y(f_0) / (2\pi f_0), \quad \text{tg } \delta = \text{Re} Y(f_0) / \text{Im} Y(f_0).$$

При измерениях в полосе частот, охватывающей резонансный промежуток, из множества значений комплексной проводимости необходимо выделить частоты резонанса и анторезонанса, добротность и сопротивление ПЭ на резонансе. Для решения этой задачи исходим из канонической эквивалентной схемы ПЭ [13], приведенной на рис. 2, которая содержит соединенные параллельно емкость C_0 , большое сопротивление потерь R_0 на низкой частоте, последовательную резонансную RLC -цепочку (колебательный контур). Такая схема замещения хорошо описывает спектр проводимости ПЭ в окрестности изолированного резонанса.

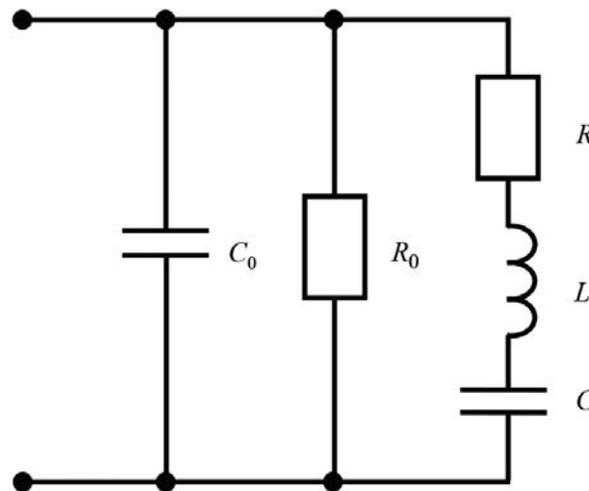


Рис. 2. Каноническая эквивалентная схема ПЭ.

Комплексную проводимость эквивалентной схемы $Y(f)$ можно представить в виде [9, 12]:

$$Y(f) = y_0 + 2\pi i f C_0 \frac{f^2 - 2i f \alpha - f_a^2}{f^2 - 2i f \alpha - f_r^2}, \quad (5)$$

где $y_0 = 1/R_0$; $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ — частота последовательного резонанса; $f_a = f_r\sqrt{1+C/C_0}$ — частота параллельного резонанса (антирезонанса); $\alpha = f_r/2Q$ — постоянная затухания; $Q = R^{-1}\sqrt{L/C}$ — добротность. Полюсы проводимости (5) определяют частоты собственных затухающих колебаний ПЭ:

$$f_{1,2} = i\alpha \pm F_r,$$

где $F_r = \sqrt{f_r^2 - \alpha^2} = f_r \sqrt{1 - 1/4Q^2}$ — резонансная частота затухающих колебаний. Нули второго слагаемого в (5):

$$f_{1,2} = i\alpha \pm F_a,$$

где $F_a = \sqrt{f_a^2 - \alpha^2}$ — антирезонансная частота с учетом затухания. Поскольку обычно $Q > 10$ для ПЭ, с хорошей точностью можно полагать $F_{r,a} \approx f_{r,a}$. Можно показать, что на частоте f_r достигается максимум активной составляющей проводимости (5), что служит аргументом в пользу использования последней в качестве оценки частоты резонанса, как указано в [14].

Таким образом, проводимость эквивалентной схемы пьезоэлемента определяется простой формулой (5), в которую входят четыре основных параметра C_0 , α , f_a^2 , f_r^2 . Они подлежат определению по измеренной зависимости комплексной проводимости Y от частоты в резонансной области. Оценки этих параметров будут получены не по отдельным значениям модуля проводимости (как предписывает [1]), и не по спектру ее вещественной части (активной составляющей) [7], что не позволяло определить f_a^2 , а по всей совокупности измеренных значений комплексного спектра проводимости в заданном диапазоне частот.

Пусть измерены $J + 1$ значений комплексной проводимости Y_j на частотах f_j , $j \in [0, J]$, $f_j \in [f_0, f_1]$, $f_j = f_0 + j/T_0$. Обозначим $\xi_0 = 2\alpha$, $\xi_1 = f_a^2$, $\xi_2 = f_r^2$. Пренебрегая в формуле (5) малой проводимостью y_0 , несущественной в резонансной области частот, запишем основное уравнение для определения трехкомпонентного вектора $\xi = (\xi_0, \xi_1, \xi_2)^T$ и параллельной емкости C_0 :

$$Y_j = 2\pi i f_j C_0 \frac{f_j^2 - i f_j \xi_0 - \xi_1}{f_j^2 - i f_j \xi_0 - \xi_2}. \quad (6)$$

Уравнение (6) дает типичный пример задачи дробно-рациональной аппроксимации, которая решается итерационным методом наименьших квадратов [15]. Введем обозначения:

$$\begin{aligned} z_1(f, \xi) &= f^2 - i f \xi_0 - \xi_1; \\ z_2(f, \xi) &= f^2 - i f \xi_0 - \xi_2; \\ G(f, \xi) &= 2\pi i f z_1(f, \xi) / z_2(f, \xi), \end{aligned}$$

в которых среднеквадратическое отклонение (СКО) левой и правой частей уравнения (6) записывается в виде:

$$\sigma^2(C_0, \xi) = M(\mathbf{Y}^\dagger - C_0 \mathbf{G}^\dagger)(\mathbf{Y} - C_0 \mathbf{G}) \equiv M \|\mathbf{Y} - C_0 \mathbf{G}\|^2, \quad (7)$$

где M — нормировочный множитель; \mathbf{Y} — вектор-столбец измеренных значения проводимости; $(\cdot)^\dagger$ — символ эрмитова сопряжения; \mathbf{G} — вектор-столбец с компонентами $G_j = G(f_j, \xi)$, $\|\cdot\|$ — евклидова норма вектора. Дифференцируя выражение (7) по переменной C_0 и приравнявая результат к нулю, найдем значение C_0 , соответствующее минимуму функции (7):

$$C_0 = \text{Re}(\mathbf{Y}^\dagger \mathbf{G}) / \|\mathbf{G}\|^2. \quad (8)$$

Подставляя в формулу (7) C_0 из выражения (8) и выбирая $M = \mathbf{Y}^\dagger \mathbf{Y} = \|\mathbf{Y}\|^2$, т.е. нормируя $\sigma^2(\xi)$ на единицу и тем самым заключая область ее значений в отрезок $[0, 1]$, получим:

$$\sigma^2(\xi) = 1 - \frac{(\text{Re}(\mathbf{Y}^\dagger \mathbf{G}))^2}{\|\mathbf{Y}\|^2 \|\mathbf{G}\|^2}. \quad (9)$$

Дифференцирование выражения (7) по компонентам вектора ξ после некоторых преобразований приводит к системе квазилинейных уравнений вида:

$$(\mathbf{M} - \Delta \mathbf{M}) \xi = \text{Re}(\mathbf{A}^\dagger \mathbf{B}) - \Delta \mathbf{B}, \quad (10)$$

где 3×3 матрица $\mathbf{M} = \text{Re}(\mathbf{A}^\dagger \mathbf{A})$; \mathbf{A} — матрица размером $(J+1) \times 3$ с элементами $A_{j,k} = \rho_j a_{j,k}$, $k=0, 1, 2$:

$$\rho_j(\xi) = |z_2(f_j, \xi)|^{-1}, \quad a_{j,0} = if_j(Y_j - 2\pi if_j C_0), \quad a_{j,1} = -2\pi if_j C_0, \quad a_{j,2} = Y_j;$$

\mathbf{B} — вектор размером $(J+1) \times 1$ с элементами $B_j = \rho_j f_j^2 (Y_j - 2\pi if_j C_0)$; $\Delta \mathbf{M}$ — диагональная матрица с ненулевыми элементами:

$$\Delta M_{0,0} = \sum_{j=0}^{J-1} |\rho_j(\xi) f_j (B_j - A_{j,k} \xi_k)|^2, \quad \Delta M_{2,2} = \sum_{j=0}^{J-1} |\rho_j(\xi) (B_j - A_{j,k} \xi_k)|^2.$$

Здесь по индексу k подразумевается суммирование от 0 до 2, а компоненты вектора $\Delta \mathbf{B}$ есть $\Delta B_0 = \Delta B_1 = 0, \Delta B_2 = \Delta M_{0,0}$.

Таким образом, формальное решение задачи дробно-линейной аппроксимации дается формулой (8) для параллельной емкости C_0 и квазилинейной системой уравнений (10), матрица и правая часть которой зависят от C_0 и неизвестного вектора ξ . Следовательно, задача должна решаться методом последовательных приближений, который может быть сформулирован как последовательность следующих действий.

1. Задаются начальные значения C_0 и $\rho_j = 1, j \in [0, J]$, элементов вектора ρ .
2. Вычисляются матрица \mathbf{A} , матрицы \mathbf{M} и $\Delta \mathbf{M}$, а также векторы \mathbf{B} , $\mathbf{A}^\dagger \mathbf{B}$ и $\Delta \mathbf{B}$.
3. Решается система (10) трех линейных уравнений с тремя неизвестными и находится трехмерный вектор ξ .
4. Вычисляется вектор \mathbf{G} , в котором используется найденный вектор ξ .
5. Находится новое значение C_0 по формуле (8).
6. Вычисляются новые значения $\rho_j = |f_j^2 - if_j \xi_0 - \xi_2|^{-1}, j \in [0, J]$.
7. Процесс продолжается с п. 2 при новых значениях C_0 и ρ .

Для практической реализации сформулированных пунктов необходимо указать способ задания начального значения C_0 и условие завершения итерационного процесса. Начальное значение C_0 естественно заимствовать из измерений емкости C_T на низкой частоте. Привлекая результаты измерений в резонансном промежутке, можно найти частоты максимума f_{\max} активной составляющей и минимума f_{\min} модуля проводимости, которые дадут начальные оценки частот резонанса и антирезонанса. Тогда начальное значение C_0 можно определить по формуле $C_0 = (f_{\min} / f_{\max})^2 C_T$. Условие завершения процесса можно задать в виде $|\xi^{(q)} - \xi^{(q-1)}| / |\xi^{(q)}| < \varepsilon_1$, где $q = 1, 2, \dots$ — номер итерации, или в виде $|C_0^{(q)} - C_0^{(q-1)}| / C_0^{(q)} < \varepsilon_2$, где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — заданные малые числа. Значения $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ подбираются так, чтобы соблюсти компромисс между количеством итераций и глубиной достигаемого минимума функции $\sigma^2(\xi)$. Обычно они принимают значения на отрезке $[10^{-3}, 10^{-5}]$. При выполнении одного или обоих условий задача считается решенной, а искомые величины определяются по формулам $f_r = \sqrt{\xi_2}, f_a = \sqrt{\xi_1}, Q = \sqrt{\xi_2} / \xi_0$, в которые подставляются значения ξ_0, ξ_1, ξ_2 , найденные на последней итерации. По найденным значениям C_0, f_r, f_a и Q легко определяются параметры эквивалентной схемы R, L, C , а f_r и f_a используются в качестве характеристических частот в методе «резонанс—антирезонанс». В отличие от метода круговых диаграмм, использованная модель не накладывает ограничений на величины механической добротности и коэффициента электромеханической связи, поэтому описанный метод интерпретации спектра комплексной проводимости применим к материалам с низкими значениями указанных параметров.

Для оценки качества результатов удобно использовать значение нормированного СКО σ_0^2 , вычисленного по формуле (9) при найденных значениях параметров эквивалентной схемы. Значениям СКО σ_0^2 , меньшим 10^{-4} , соответствует высокое качество аппроксимации, значения $\sigma_0^2 \in [10^{-4}, 10^{-2}]$ означают удовлетворительное качество, а неравенство $\sigma_0^2 > 10^{-2}$ свидетельствует о том, что результаты неудовлетворительны по той простой причине, что частотная зависимость измеренной проводимости ПЭ не описывается канонической эквивалентной схемой с достаточной степенью точности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Прежде всего оценивался выигрыш во времени выполнения измерений, достигаемый за счет применения импульсного метода возбуждения. Для сравнения использовался анализатор импеданса НЮКИ ИМ3570. Измерения проводились в диапазоне частот 90—120 кГц. Максимальное число частотных позиций указанного анализатора $N = 800$, среднее время измерений 6 с, т.е. время, затрачиваемое на измерение спектра проводимости в одной частотной позиции, составляет 7,5 мс при шаге по частоте 37,5 Гц. Для импульсного режима возбуждения примем значение частоты дискретизации $F_d = 2,5$ МГц и максимальный объем выборки $N = 2^{18}$ отсчетов. Тогда шаг по частоте $\Delta f = F_d / N = 9,54$ Гц. При этом в рабочий диапазон измерений попадают 3145 частотных позиций. Общее время измерения спектра проводимости, включая обработку, составляет примерно 5 с. Таким образом, удельное время на одну частотную позицию составит чуть меньше, чем 1,6 мс. Следовательно, в приведенном примере время измерения, затрачиваемое на одну частотную позицию спектра проводимости, сокращается почти в пять раз по сравнению с использованием генератора качающейся частоты и возбуждения ПЭ в квазигармоническом режиме. При этом в импульсном режиме частотное разрешение и время измерений зависят только от объема выборки и частоты дискретизации, но никак не от частотного диапазона измерений. С расширением этого диапазона возрастает число актуальных отсчетов спектра проводимости, но не время измерений. А поскольку основные параметры ПЭ определяются по всей совокупности отсчетов, то снижается влияние шумов и помех на результаты, тем самым повышая их точность.

Необходимо отметить, что пример оценки времени измерений приведен для экстремальных значений F_d и N . Их оптимальный подбор в соответствии с заданным частотным диапазоном и параметрами ПЭ позволяет сократить время измерений до 1 с.

Для исключения погрешностей, вносимых неидеальными характеристиками измерительной схемы, должны быть предусмотрены процедуры калибровки и компенсации [10]. Калибровка заключается в измерении и последующем учете неидентичности амплитудно-фазовых характеристик двух измерительных каналов (усилителей и АЦП). Процедура компенсации состоит в определении величин паразитных связей держателя измеряемого ПЭ, а именно параллельной емкости, последовательной индуктивности и тангенсов углов потерь в них. Для этого проводятся измерения в режиме короткого замыкания и полного размыкания держателя. В процессе измерения полученная информация о паразитных связях используется для коррекции комплексной проводимости [16].

На рис. 3 приведены элементы управления аппаратурой, результаты текущих измерений, настройки аппаратуры и данные калибровки, иллюстрирующие процесс выполнения измерений.

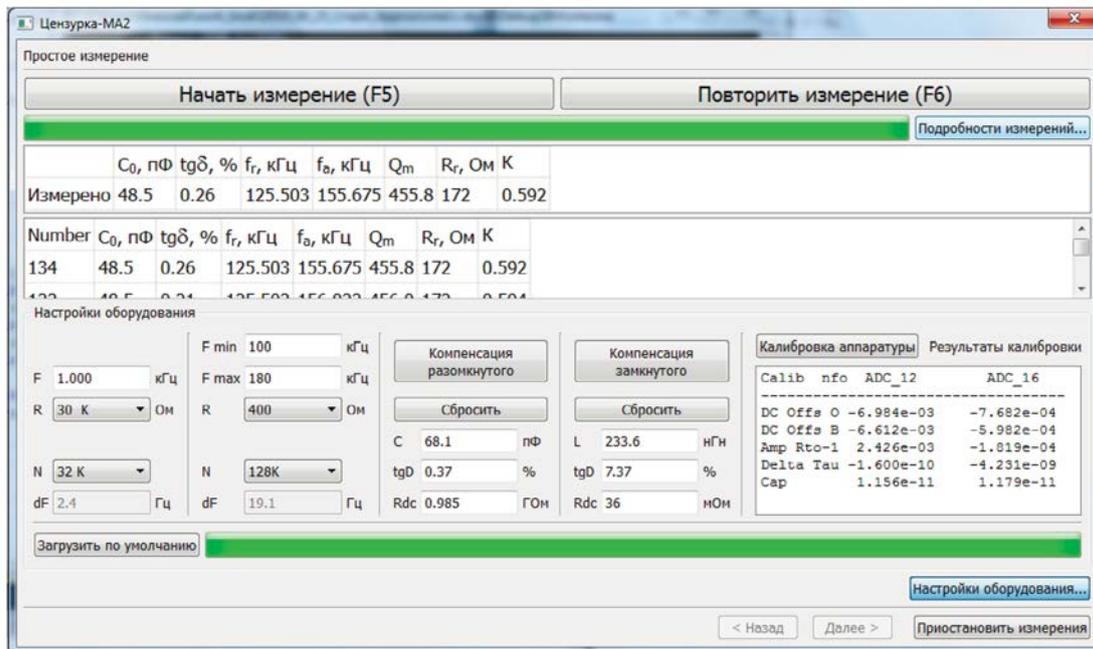


Рис. 3. Управление, настройки параметров и отображение результатов.

Приведем пример экспериментальных исследований, для которого был выбран столбик квадратного сечения с размерами $6 \times 6 \times 13,4$ мм из пьезокерамики ПКВ-460 с электродами, расположенными на его торцах. Вследствие низкой емкости свободного образца $C_f \approx 50$ пФ резонансный промежуток достаточно велик, а частотная зависимость модуля проводимости в окрестности частоты антирезонанса оказывается очень пологой. Поэтому сравнивались два метода определения частоты антирезонанса: первый — как частоты минимума модуля проводимости [1, 7] и второй — как результат дробно-рациональной аппроксимации частотной зависимости спектра проводимости в полосе частот, охватывающей резонансный промежуток.

Обработка результатов $M = 128$ измерений дала следующие результаты. Средние значения и стандартные отклонения частоты антирезонанса составили соответственно $F_{a1} = 156,100$ кГц, $\sigma_1 = 382$ Гц для первого метода и $F_{a2} = 155,736$ кГц, $\sigma_2 = 39$ Гц для второго. Таким образом, случайная погрешность определения частоты антирезонанса в методе дробно-рациональной аппроксимации оказалась на порядок ниже. Результаты эксперимента отражают гистограммы, приведенные на рис. 4, каждая из которых построена на 8 частотных интервалах. По оси ординат отложено отношение $p_{\text{отн}} = M_m/M$, где M_m , $m \in [1, 8]$ — число значений $F_{a1,2}$, оказавшихся в m -м частотном интервале. Систематическое смещение F_{a2} в сторону низких частот обусловлено тем, что частота параллельного резонанса канонической эквивалентной схемы не совпадает с частотой минимума модуля проводимости [4, 17]. Тем самым устраняется систематическая погрешность, присущая амплитудным измерениям.

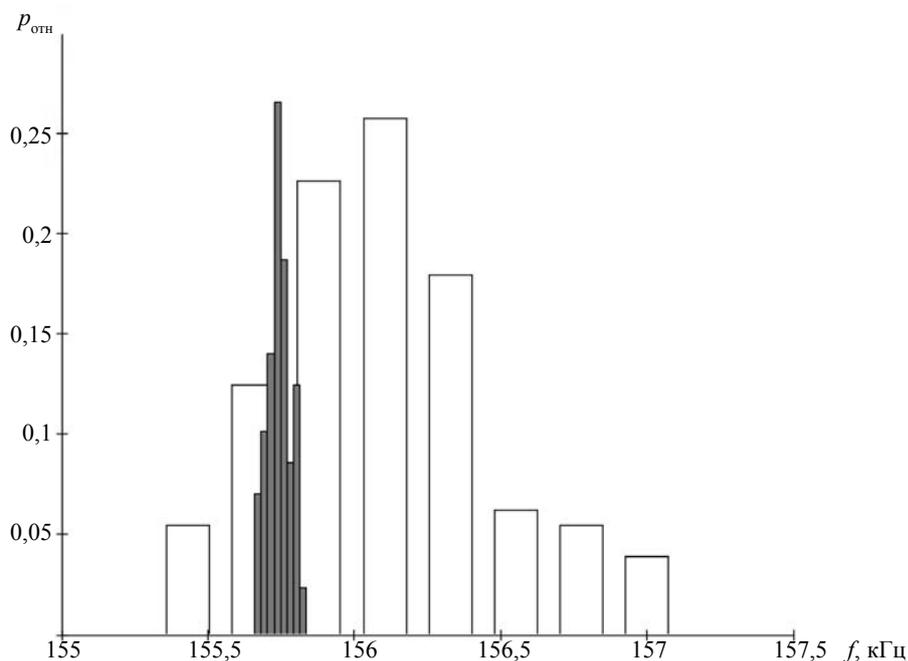


Рис. 4. Гистограмма частоты антирезонанса: светлые столбики — F_{a1} , темные столбики — F_{a2} .

ВЫВОДЫ

Таким образом, в настоящей работе предложен способ определения основных параметров пьезоэлектрических элементов, особенности которого заключаются в следующем.

1. Частотная характеристика проводимости ПЭ определяется в импульсном режиме, т.е. при однократном, а не многократном воздействии внешнего сигнала на образец, чем достигается существенное сокращение времени измерений.

2. Повышение точности измерений достигается применением АЦП с достаточно широким динамическим диапазоном (более 70 дБ), компенсацией погрешностей, вносимых неидеальными характеристиками измерительной схемы, а также использованием для оценки свойств ПЭ комплексного спектра проводимости, измеренного во всем резонансном промежутке.

3. Параметры канонической эквивалентной схемы ПЭ определяются подгонкой к измеренному спектру комплексной проводимости методом дробно-рациональной аппроксимации. Наряду с параллельной емкостью, частотой резонанса и постоянной затухания, в набор этих параметров включена частота антитрезонанса, что, как показано выше, существенно снижает погрешность ее определения.

4. Приведены результаты эксперимента, подтверждающие преимущества предложенного способа по быстродействию и точности определения основных параметров эквивалентной схемы ПЭ.

Таким образом, применение импульсного сигнала с линейной частотной модуляцией, полностью цифрового способа определения комплексной проводимости и определения по спектру проводимости параметров эквивалентной схемы ПЭ существенно уменьшает длительность измерений и снижает их погрешность. На базе предложенного способа разработана автоматизированная аппаратура для исследования и контроля пьезоэлементов и пьезоматериалов, которая используется как в лабораторных условиях, так и на производстве. Аппаратура сертифицирована и выпускается серийно в различных модификациях под общим названием «Цензурка».

Авторы признательны В.В. Мадорскому за предоставленные материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ II 0444—87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: Электростандарт, 1987. 141 с.

2. *Виноградов Д.А., Наседкин А.В., Паринов И.А., Рожков Е.В.* Определение электрических и механических характеристик пьезокерамических элементов // Дефектоскопия. 2002. № 2. С. 18—25.

3. *Fialka J., Benes P.* Comparison of Methods for the Measurement of Piezoelectric Coefficients // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2013. V. 62. № 5. P. 1047—1057.

4. Пьезокерамические преобразователи / Справочник. Под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.

5. *Longbiao He, Xiuiuan F., Triantafillos K., Feng N., Bo Z., Ping Y.* Comparison between methods for the measurement of the d_{33} constant of piezoelectric materials / 25th International Congress on Sound and Vibration. 8—12 July 2018. Hiroshima. P. 1—8.

6. *Biao H.L., Wen Z.R., Jiang Z.H., Ping Y.* Measurement of Piezoelectric Strain Constant Based on Virtual Instrument Technology by Dynamic Method // Applied Mechanics and Materials. 2013. V. 333—335. P. 2422—2427.

7. *Иванов Н.М., Кондаков Е.В., Милославский Ю.К.* Цифровая аппаратура и алгоритмы оперативного измерения параметров изделий пьезотехники // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2005. Т. 46. № 2. С. 78—83

8. *Karlash V.L.* Analysis of the methods of determination of the viscoelastic coefficients of piezoceramic resonators // Journal of Mathematical Sciences. 2017. V. 226. No. 2. P. 123—138.

9. *Кондаков Е.В., Иванов Н.М., Милославский Ю.К.* Пат. 2584719 РФ. Цифровой способ измерения параметров пьезоэлектрических элементов // Изобретения. Полезные модели. 2016. № 14.

10. *Sherrit S., Mukherjee B.K.* Characterization of piezoelectric materials for transducers // arXiv preprint arXiv: 0711.2657. 2007.

11. *Jiménez F.J., González A.M., Pard L. et al.* A Virtual Instrument for Measuring the Piezoelectric Coefficients of a Thin Disc in Radial Resonant Mode // Sensors 21. 2021. № 12. P. 4107.

12. *Иванов Н.М., Кондаков Е.В., Милославский Ю.К.* Моделирование измерительной спектроскопии комплексной проводимости пьезоэлектрических элементов // Научно-технический сборник «Гидроакустика». 2022. № 51(3). С. 69—78.

13. Пьезоэлектрические резонаторы / Справочник. Под ред. П.Е. Кандыбы, П.Г. Позднякова. М.: Радио и связь, 1992. 392 с.

14. *Мадорский В.В., Рогов И.Е., Скрылев А.Н.* Экспериментальное определение полного набора констант поляризованной пьезокерамики на одном образце в форме кольца // Измерительная техника. 2019. № 12. С. 20—25.

15. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

16. *Кондаков Е.В.* Анализ источников погрешностей измерения параметров пьезоэлементов и пути их снижения / Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения: Сборник трудов Международной молодежной научной конференции, Анапа, 23—27 сентября 2013 года. Анапа: Южный федеральный университет, 2013. С. 172—175.

17. International Standard CEI/IEC 60483: 1976. Guide to dynamic measurements of piezoelectric ceramics with high electromechanical coupling.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА АКУСТИЧЕСКИМ АМПЛИТУДНО-ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

© 2023 г. О.П. Богдан¹, О.В. Муравьева^{1,2,*}, А.В. Блинова¹, Д.В. Злобин¹

¹ *Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова, Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7*

² *Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: *pmkk@istu.ru*

Поступила в редакцию 20.06.2023; после доработки 30.06.2023
Принята к публикации 30.06.2023

Представлены результаты исследования чувствительности акустического метода контроля плотности образцов из терморасширенного графита, основанного на регистрации изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь образец, обусловленное изменением плотности, показавшие, что предельная чувствительность метода соизмерима с погрешностью измерения плотности прямым весовым методом и массы составила 26 кг/м³ и 0,02 г соответственно. Проведена оценка неравномерности распределения плотности по площади образцов из ТРГ разной толщины, при этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала сквозь образец, пропорциональное отклонению плотности, для некоторых листов достигло до 50 %, для матов — 30 %, а наименьшее не превысило 10 %. В процессе сканирования выявлена обратно пропорциональная зависимость амплитуды прошедшего акустического сигнала от средней плотности образцов, наиболее выраженная для малых толщин матов и листов ТРГ.

Ключевые слова: терморасширенный графит, акустический амплитудно-теневой метод, плотность, чувствительность, амплитуда прошедшего сигнала.

DOI: 10.31857/S0130308223080031, **EDN:** DYT1AG

ВВЕДЕНИЕ

Графит и различные композиционные материалы на его основе, включая интеркалированные соединения графита, широко используются в различных областях науки, техники и промышленности [1]. Большое распространение среди данных материалов получил терморасширенный графит (ТРГ), представляющий собой углеродный материал с пористой структурой [2], благодаря которой обладает высокими физическими и химическими свойствами. Основные характеристики ТРГ включают высокопористую структуру, очень малый вес, высокие механические свойства, регулируемую теплопроводность [2—5], высокую электропроводность, высокую удельную емкость [6], эрозионную стойкость и низкую стоимость.

В настоящее время разработано большое количество технологий изготовления ТРГ, суть которых сводится к следующему: ТРГ получают посредством интеркалирования графита с последующим термовоздействием [2] и приданием конечной формы путем прессования или проката [7, 8] и при необходимости вырубке. Свойства ТРГ существенно зависят от технологии получения ТРГ, вводимых компонентов, методов интеркаляции [5] и терморасширения [9, 10]. Например, увеличение пористости ТРГ и механических свойств достигается путем введения различных органических и неорганических добавок [5], изменения теплостойкости, электропроводности и сорбционных свойств можно обеспечить в результате интеркалирования различными кислотами [3, 5, 7, 11—13], добиться магнитных свойств возможно присадкой к ТРГ ферромагнитного металла [14].

Благодаря технологии получения, свойств и исходным материалам ТРГ создают предпосылки для разработки разнообразных многофункциональных материалов [5, 11—16].

Широкое использование материалы из ТРГ получили в качестве огнезащитного [17] и теплоизоляционного средства, радиационного [18] и теплоотражающего экрана [5] в атомной и химической промышленности в условиях высоких температур. ТРГ используется в качестве высокоэффективных прокладок и уплотнителей для нефтегазодобывающей, нефтеперерабатывающей, химической промышленности и в гидросооружениях [4, 19]. Известны факты использования ТРГ в качестве катализаторов химических источников тока [7], проводящих наполнителей [20], топливных элементов [21], для очистки сточных и природных вод, в том числе при сорбции нефти и нефтепродуктов из водной среды [22].

В настоящее время активно ведутся исследования новых возможностей применения ТРГ в качестве модифицирующего компонента для улучшения свойств различных электродов [7, 23], анти-

фрикционных материалов на полимерной основе для узлов техники и технологического оборудования [24], порошковых сталей [16], в качестве материалов для производства электрохимических и суперконденсаторов [25].

На данный момент активно ведутся исследования морфологии структуры ТРГ, обусловленной технологией производства и оптимизацией режимов измельчения частиц [26], позволяющие повысить качество и минимизировать появление дефектов; исследуются теплостойкость и теплопроводность ТРГ и способы их варьирования [3, 5, 9, 12, 18, 20], термическая стабильность [21], коэффициент трения и износостойкость [27], возможность получения магнитных свойств [14].

Физико-механические свойства терморасширенного графита исследуются преимущественно разрушающими методами, требующими специализированного оборудования, длительного срока подготовки образцов и продолжительных испытаний особенно в условиях внешних воздействий (влажность, агрессивные среды, температурные воздействия и другие), а также методами дифференциального термического анализа и циклической вольтамперометрии [21]. Контроль и исследование структуры ТРГ проводят преимущественно методами рентгенофазового анализа, электронной и романовской спектроскопии [14]. Неразрушающий контроль состояния изделий из ТРГ в процессе эксплуатации проводят оптическими методами на базе оптоволоконных технологий [4].

Важным этапом производства изделий из ТРГ является контроль полотна в процессе его формирования, направленный на выявление основных дефектов проката, таких как разнотолщинность и разноплотность по длине и ширине полотна, расслоения, пузыри воздуха [8, 28].

Одной из важнейших характеристик ТРГ является плотность, которая зависит от технологии получения и назначения изделия. Разноплотность — основной дефект, возникающий при прокатке полотна из ТРГ, как в направлении прокатки, так и по ширине листа [8, 28—30].

Для контроля плотности ТРГ при выборочном контроле используется прямой весовой метод, не позволяющий оценить ее распределение по площади образца. Радиочастотный метод оценки разноплотности (Патент № 2257342) обладает недостаточной чувствительностью и разрешающей способностью. Использование радиационного метода [31] ограничено требованиями безопасности.

Перспективные варианты оценки структурного состояния материалов и изделий из пористых материалов, в том числе ТРГ, связаны с акустическими методами неразрушающего контроля, характеризующимися достаточно высокой чувствительностью, достоверностью и оперативностью с возможностью сплошного контроля [29, 30, 32, 33]. Ввиду того, что акустические свойства пористых материалов напрямую определяются их физико-механическими параметрами (плотность, упругость), использование акустических методов при контроле разноплотности представляется наиболее целесообразным.

Цель работы: исследование чувствительности акустического метода для контроля плотности листов и матов образцов из терморасширенного графита и определения равномерности ее распределения по площади образца.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе исследованы образцы матов и листов из ТРГ, изготовленные на предприятии ООО «СИЛУР», различной толщины в количестве 9 партий различных диапазонов плотности в общем количестве 45 образцов размером 300×300 мм (табл. 1, табл. 2).

Таблица 1

Параметры исследуемых матов из ТРГ

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Средняя толщина h , мм / # партии	4,9 / #1						7,2 / #2					10,2 / #1					
Средняя плотность ρ , кг/м ³	34	38	53	66	78	90	112	122	126	133	148	135	151	154	165	171	180

Таблица 2

Параметры исследуемых листов из ТРГ

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Средняя толщина h , мм / # партии	1,5 / #1			1,0 / #2					0,8 / #3					
Средняя плотность ρ , кг/м ³	643	709	1147	802	1017	1139	1189	1363	764	895	1044	1084	1142	1509
№ п/п	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Средняя толщина h , мм / # партии	0,6 / #4						0,4 / #5			0,2 / #6				
Средняя плотность ρ , кг/м ³	722	911	1131	1196	1523	1543	1076	1225	1315	938	994	1034	1405	1468

Для исследований использована установка для контроля пористых материалов, входящая в состав УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий». Установка (Патент № 2796231) реализует амплитудно-теневой метод акустического контроля с использованием воздушных акустических преобразователей. Блок-схема и фото экспериментальной установки представлены на рис. 1 [32].

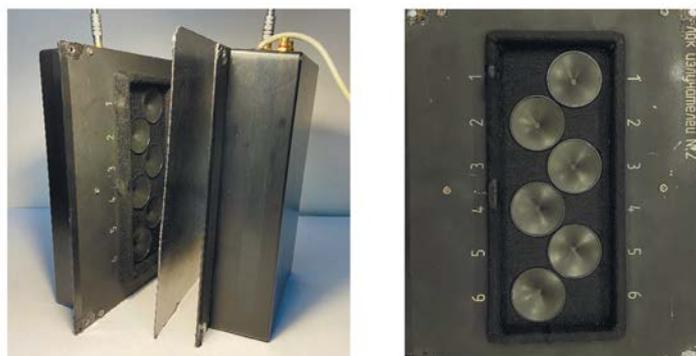
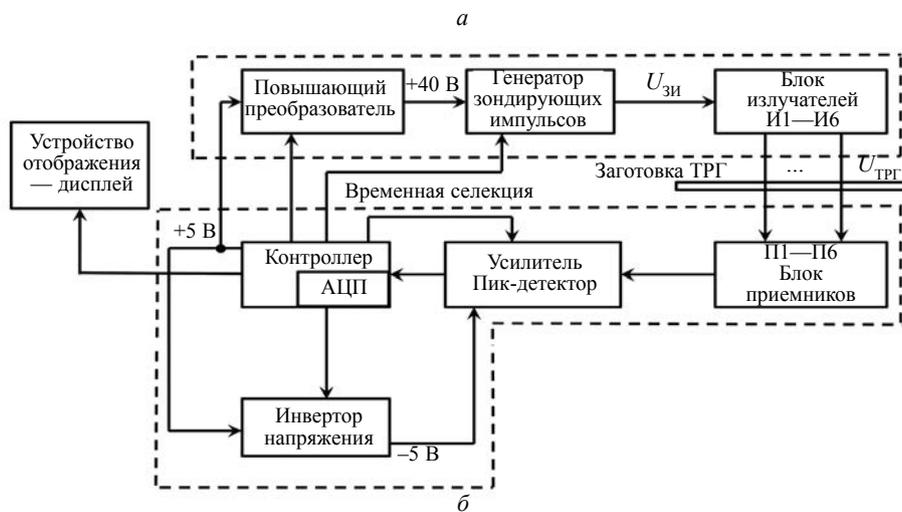


Рис. 1. Блок-схема (а) и фото (б) экспериментальной установки для исследований пористых материалов.

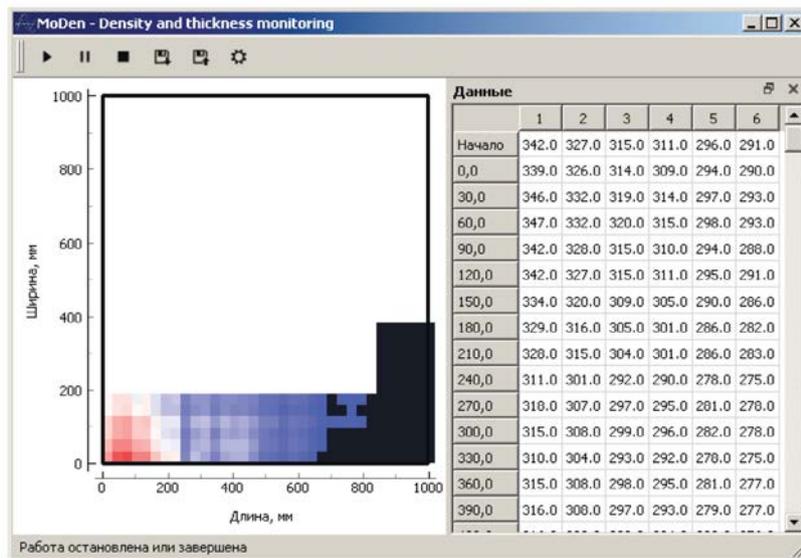


Рис. 2. Таблица и карта результатов контроля плотности пористых сред.

Генератор зондирующих импульсов служит для возбуждения блока низкочастотных акустических излучателей. Прошедшие через объект исследования импульсы акустической волны поступают на блок акустических приемников и усиливаются. Амплитуда сигнала, прошедшего через объект исследования, селектированная по времени, через пик-детектор передается на плату АЦП контроллера и далее на устройство отображения. Управление и обработка сигналов происходит с помощью микроконтроллера. Акустические пьезопреобразователи обеспечивают эффективное излучение и прием волн через воздушную среду за счет эффекта изгибных колебаний пьезопластин, согласование которых с низким импедансом объекта исследования через промежуточную воздушную среду — наилучшее. Специализированное программное обеспечение позволяет визуализировать распределение амплитуд сигналов, прошедших через объект как в табличном, так и в графическом виде (рис. 2).

Основные технические характеристики экспериментальной установки представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики экспериментальной установки

Характеристика	Значение
Количество каналов	6
Рабочий диапазон частот	7—15 кГц
Амплитуда зондирующего импульса	15 В, 30 В, 45 В
Частота следования зондирующих импульсов	2 Гц
Коэффициент усиления	30—1000
Общий потребляемый ток	25 мА
АЦП	10 бит, частота дискретизации 10 кГц
Электропитание установки	+5 В
Пространственная разрешающая способность	50×50 мм
Погрешность измерения	± 3 отн.ед.

При прочих равных условиях метод наиболее чувствителен к изменению плотности и толщины объекта исследования и может быть позиционирован как метод оценки количества вещества (массы) объекта [29, 30, 32, 33].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В производственных условиях предприятия ООО «СИЛУР» проведена верификация разработанного метода посредством сравнения результатов оценки плотности на образце листа ТРГ с результатами контроля массы (плотности), полученными прямым методом взвешивания. С целью отстройки от коэффициента преобразования по каждому из каналов осуществлена предварительная калибровка по шести каналам на настроечном образце (НО) с известной толщиной h и плотностью, измеренной прямым методом. Настроечный образец, проконтролированный акустическим методом, в дальнейшем подвергался вырубке прозвучиваемых (контролируемых) участков с использованием металлического тонкостенного шаблона с диаметром, соответствующим апертуре акустических датчиков ($D = 34$ мм). Масса образцов после вырубки измерялась с помощью весов аналитических ГОСМЕТР ВЛ-64 с точностью определения $\Delta m = \pm 0,1$ мкг, толщина образцов — с помощью электронного штангенциркуля ШЦЦ-1-125 с точностью 10 мкм.

Плотность вырубки образца прямым методом определялась по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi \cdot D^2 \cdot h}, \quad (1)$$

где m — масса вырубки образца; V — объем вырубки образца; D — диаметр вырубки образца; h — средняя толщина вырубленного образца.

В табл. 4 приведены результаты акустических измерений и прямых измерений плотности для настроечного образца и их пересчете в коэффициент преобразования канала.

Таблица 4

Результаты прямых измерений плотности и акустических измерений на настроечном образце

Номер канала	Толщина вырубки НО $h_{\text{НО}}$, мм	Масса вырубки образца $m_{\text{НО}}$, г	Плотность вырубки НО $\rho_{\text{НО}}$, кг/м ³	Амплитуда акустического сигнала $U_{\text{НО}}$, отн.ед.	Коэффициент преобразования канала, отн. ед. · м ³ /кг
1	1,05	0,8828	926	342	0,369
2	1,04	0,8846	936	377	0,403
3	1,04	0,8755	927	375	0,405
4	1,04	0,8765	928	383	0,413
5	1,05	0,8653	907	342	0,377
6	1,06	0,8682	902	395	0,438

Верификация методики проведена на листах ТРГ в диапазоне толщин от 1,03 до 1,08 мм и плотностей от 930 до 1130 кг/м³, определенных прямым методом взвешивания и акустическим методом. Строилась корреляция между изменением амплитуды ΔU прошедшего сигнала через исследуемый образец относительно амплитуды на настроечном образце $U_{\text{НО}}$ ($\Delta U = U - U_{\text{НО}}$) и изменением плотности $\Delta \rho$ (массы Δm) ($\Delta \rho = |\rho_{\text{НО}} - \rho|$, $\Delta m = |m_{\text{НО}} - m|$) по каждому из каналов.

Корреляцию между акустическими измерениями и прямыми измерениями изменения по плотности и изменения по массе относительно настроечного образца иллюстрирует калибровочная зависимость на рис. 3. Наблюдается однозначная линейная зависимость акустических измерений и измерений прямым весовым методом с коэффициентом корреляции R^2 , равным 0,94 для плотности и 0,95 для массы.

Погрешность измерения амплитуды не превышает ± 3 отн. ед. Погрешность определения плотности прямым весовым методом может быть рассчитана по формуле:

$$\delta \rho = \sqrt{\left(\frac{4\delta m}{\pi \cdot \bar{D}^2 \cdot \bar{h}}\right)^2 + \left(\frac{2\bar{m} \cdot \delta D}{\pi \cdot \bar{D}^3 \cdot \bar{h}}\right)^2 + \left(\frac{4\bar{m} \cdot \delta h}{\pi \cdot \bar{D}^2 \cdot \bar{h}^2}\right)^2}, \quad (2)$$

где δm — погрешность измерения массы вырубki образца; δD — погрешность измерения диаметра вырубki образца; δh — погрешность измерения толщины вырубki образца; \bar{m} — средняя масса вырубki образца; \bar{D} — средний диаметр вырубki образца; \bar{h} — средняя толщина вырубki образца.

При погрешности определения толщины и диаметра образца $\delta D = \delta h = 10$ мкм и погрешности определения массы $\delta m = 0,1$ мкг, погрешность определения плотности составила $\delta \rho = \pm 19$ кг/м³.

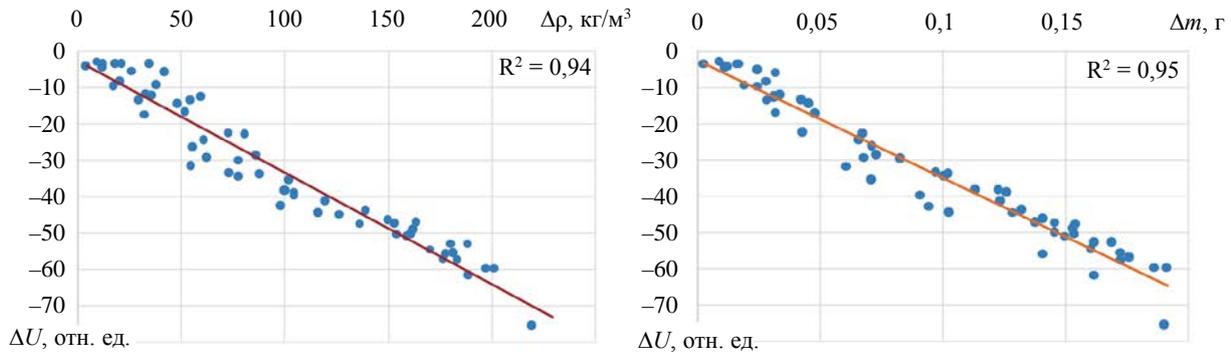


Рис. 3. Калибровочная зависимость изменения амплитуды прошедшего сигнала от изменения плотности.

С использованием калибровочной зависимости может быть оценена чувствительность акустического метода к изменению плотности S_ρ и к изменению массы S_m для листа данной толщины:

$$S_\rho = \frac{\Delta U}{\Delta \rho} = 0,34 \frac{\text{отн.ед.} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}, \quad S_m = \frac{\Delta U}{\Delta m} = 385 \frac{\text{отн.ед.}}{\text{г}}. \quad (3)$$

В предположении, что на фоне помех может уверенно выделяться сигнал, превышающий уровень шума в три раза (9 отн. ед.), метод позволяет оценить изменение плотности 26 кг/м³ и изменение массы 0,02 г, что соизмеримо с погрешностями их измерения прямым методом.

Следует отметить, что чувствительность метода, определяющая тангенс угла наклона калибровочной прямой, может меняться в зависимости от толщины и вида образца ТРГ, что объясняется сложностью и неоднозначностью физических процессов прохождения акустических волн через неоднородные пористые среды, связанных с коэффициентами пористости и извилистости пор, акустическими свойствами упругого пористого скелета, содержимого пор и давления в них [34].

Для оценки неравномерности распределения плотности (амплитуды акустического сигнала) по площади образца сканировались с использованием шестиканального устройства с расстановкой преобразователей согласно разметке в четырех положениях согласно схеме на рис. 4.

В опорной точке образца ТРГ с известной плотностью и толщиной проводилась калибровка 6 каналов установки.

В процессе сканирования регистрировалась амплитуда прошедшего сигнала U в каждой точке измерения и оценивалось отклонение ее от амплитуды опорного сигнала $U_{\text{оп}}$:

$$\Delta U = \frac{U - U_{\text{оп}}}{U_{\text{оп}}} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты распределения по площади относительной амплитуды акустического сигнала для образцов листов с номинальной толщиной 0,2 и 0,6 мм различной плотности с наиболее выраженной и наименее выраженной неравномерностями.

Согласно рис. 5, образец листа ТРГ #24 ($h = 0,2$ мм, $\rho = 938$ кг/м³) (рис. 5а) является наиболее неравномерным по распределению плотности и имеет максимальное отклонение амплитуды прошедшего сигнала от опорного значения 37 % в положении I-1. Высокое отклонение по

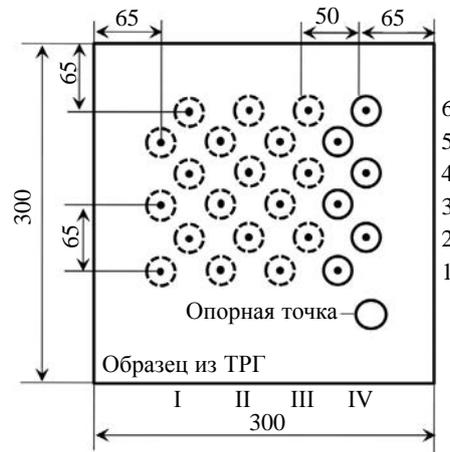
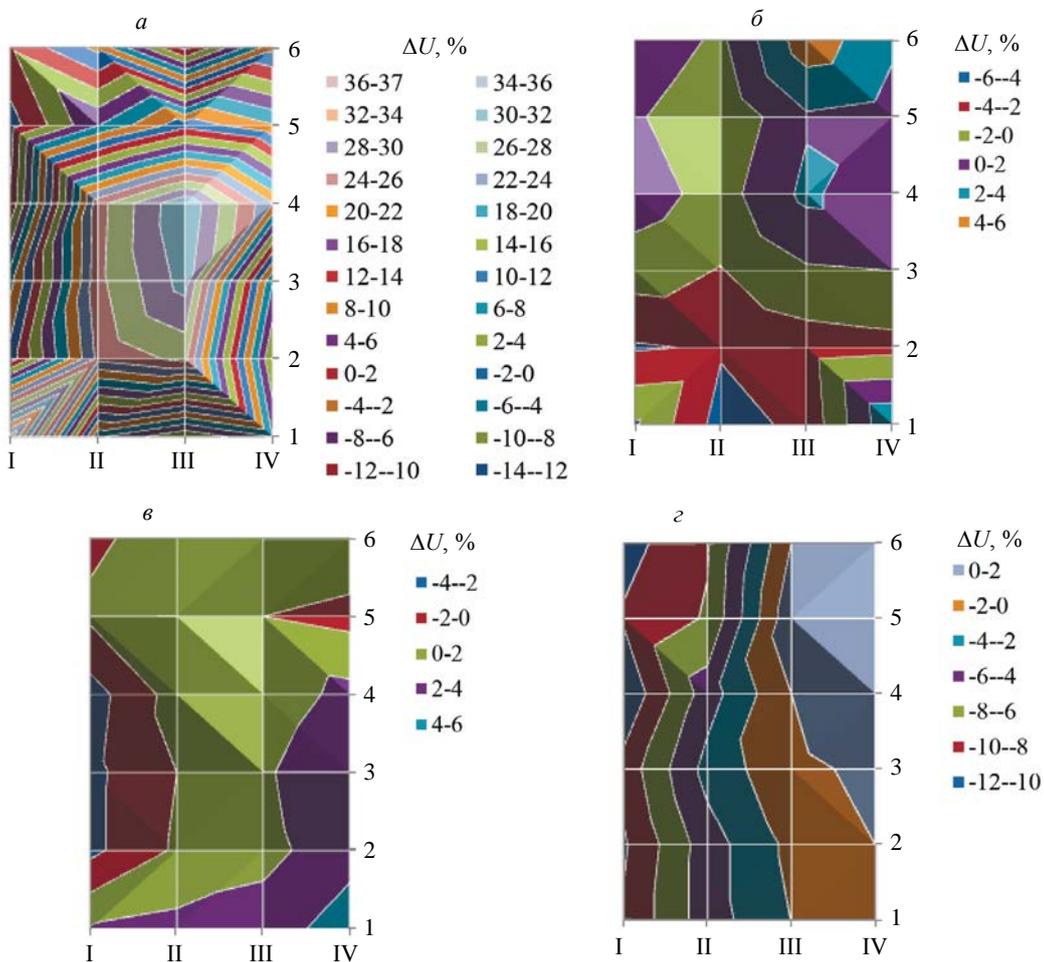


Рис. 4. Схема сканирования образцов ТРГ.

Рис. 5. Распределение относительной амплитуды сигнала по площади образцов листов ТРГ: образец #24 ($h = 0,2$ мм, $\rho = 938$ кг/м³) (а); образец #27 ($h = 0,2$ мм, $\rho = 1405$ кг/м³) (б); образец #15 ($h = 0,6$ мм, $\rho = 722$ кг/м³) (в); образец #18 ($h = 0,6$ мм, $\rho = 1196$ кг/м³) (з).

плотности наблюдается также по центру образца (положение III-3, III-4). При этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала по площади образца от опорного значения лежит в диапазоне от -13 до 37 %. Наиболее равномерным по распределению плотности является образец листа ТРГ

#27 ($h = 0,2$ мм, $\rho = 1405$ кг/м³) (рис. 5б), для которого максимальное отклонение амплитуды прошедшего сигнала от опорного значения составило 5 % в положении III-6, при этом отсутствуют локальные ярко выраженные области существенного отклонения плотности. Для данного образца из ТРГ отклонение амплитуды прошедшего сигнала по его площади от опорного значения лежит в диапазоне от -5 до 5 %. Среди исследуемых образцов номинальной толщиной $h = 0,6$ мм, наибольшую неравномерность имеет образец листа ТРГ #18 (-12 % в положении I-4 — рис. 5з), наименьшую — образец #15 (5 % в положении I-5 — рис. 5е), при этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала по площади образца от опорного значения составило от -3 до 5 % и от -12 до 2 % для образцов #15 и #18 соответственно.

Указанные закономерности связаны с технологией производства листов вследствие неравномерного распределения порошка по площади прокатного стана, износа прокатных роликов или нарушения скорости их вращения.

Для образцов матов ТРГ толщиной 10,2 мм результаты оценки неравномерности иллюстрирует рис. 6. Максимальное отклонение плотности от опорного значения -21 % имеет образец #13 плотностью 154 кг/м³ в положении III-6, при этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала по площади образца от опорного значения составляет от -21 до 8 % (рис. 6а). Образец #17 плотностью 180 кг/м³ (рис. 6б) имеет максимальное отклонение плотности от опорного значения -5 % в положении IV-6, при этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала по площади образца от опорного значения составляет от -5 до 4 %.

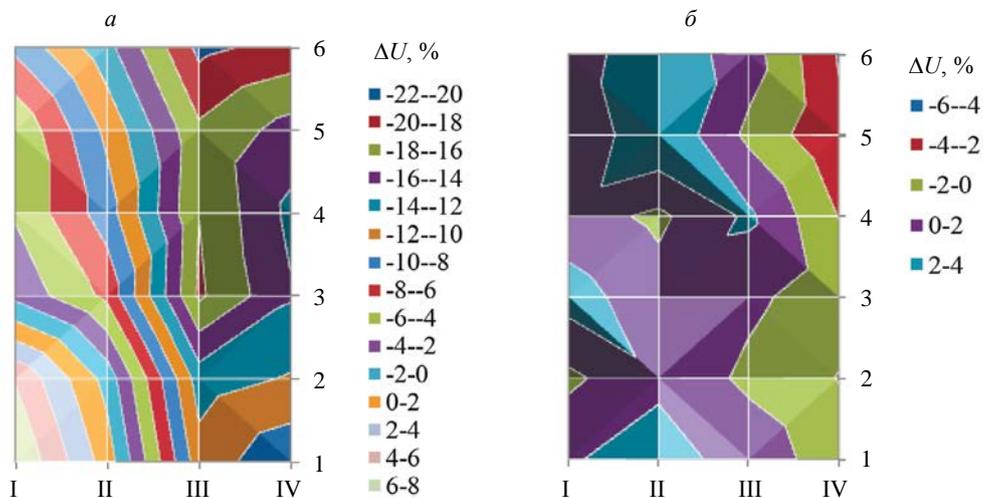


Рис. 6. Распределение относительной амплитуды сигнала по площади образцов матов ТРГ: образец #13 ($h = 10,2$ мм, $\rho = 154$ кг/м³) (а); образец #17 ($h = 10,2$ мм, $\rho = 180$ кг/м³) (б).

Зависимости амплитуды прошедшего сигнала в опорной точке $U_{\text{оп}}$ от средней плотности образца ρ для всех партий исследованных образцов и матов представлены на рис. 7. Для всех исследованных партий образцов наблюдается обратно пропорциональная зависимость амплитуды акустического сигнала от плотности образца, при этом крутизна и линейность указанных кривых существенно различна для разных значений толщины и плотности. Для образцов листов ТРГ толщиной $h = 0,2$ мм линейный характер зависимости амплитуды прошедшего сигнала от средней плотности образца ρ нарушается, при этом имеет место большой разброс экспериментальных точек, что обусловлено существенными вариациями плотности и толщины листа от средних значений, обусловленными сложностью обеспечения постоянства плотности при производстве листов и матов малых толщин. Так результаты измерения показывают, что наибольшее отклонение толщины по площади листа от среднего значения для партии листов ТРГ #6 ($h = 0,2$ мм) составляет 10 %, что объясняет нелинейную зависимость и достаточно большое отклонение амплитуды прошедшего сигнала от линии тренда.

Гистограммы чувствительности к изменению плотности для различной толщины листов и матов иллюстрирует рис. 8. Чувствительность оценена согласно линиям тренда, как отношение изме-

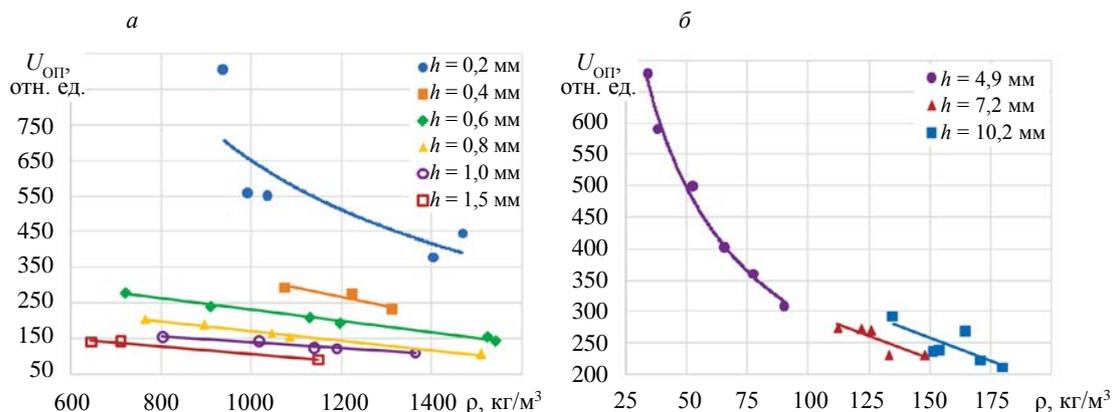


Рис. 7. Зависимости амплитуды прошедшего сигнала в опорной точке от средней плотности образцов ТРГ для пары преобразователей И1-П1: листы (а); маты (б).

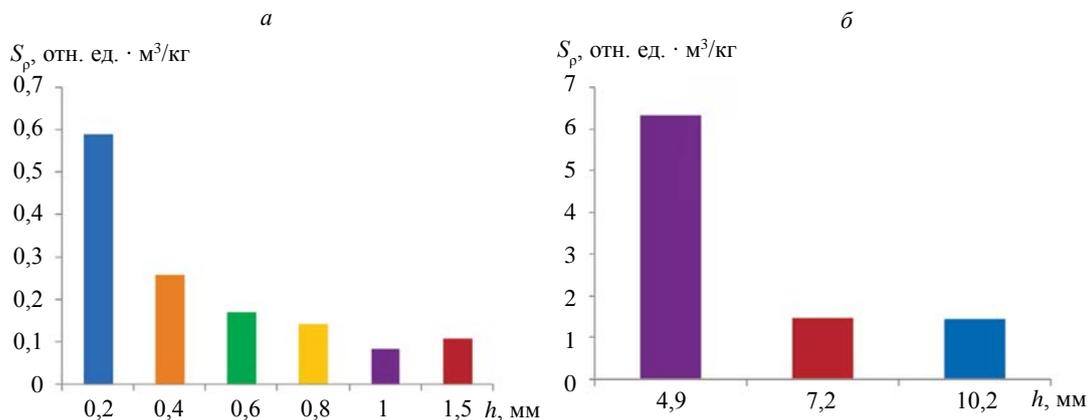


Рис. 8. Гистограммы чувствительности к изменению плотности для различной толщины листов (а) и матов (б).

нения амплитуды сигнала к соответствующему изменению средней плотности объекта. Согласно рис. 8, наибольшей чувствительностью к изменению плотности обладают листы и маты малой толщины (0,2 и 4,9 мм соответственно). Представленные зависимости показывают необходимость предварительного построения калибровочных кривых для каждой толщины контролируемых партий объектов при оценке абсолютных значений плотности акустическим методом.

ВЫВОДЫ

1. Выявлена линейная зависимость отклонения амплитуды прошедшего акустического сигнала от изменения плотности заготовки, полученной прямым весовым методом.
2. Проведена оценка предельной чувствительности акустического метода к изменению плотности и массы, составляющая 26 кг/м^3 и $0,02 \text{ г}$, что соизмеримо с погрешностями их измерения прямым методом.
3. Исследования разноплотности образцов листов и матов ТРГ показали, что для тонких образцов листов отклонения по плотности могут достигать 50 %, для матов — 30 %, при этом минимальная разноплотность для листов — не превышает 10—12 % относительно опорного значения.
4. Наблюдается обратно пропорциональная зависимость амплитуды прошедшего акустического сигнала от средней плотности образцов, наиболее выраженная для малых толщин матов и листов ТРГ.
5. Исследованные закономерности могут быть положены в разработку методов акустического контроля плотности и отклонений от нее для листов и матов ТРГ в процессе производства.

Авторы выражают благодарность сотрудникам предприятия ООО «СИЛУР» Д.В. Смирнову, А.А. Пономареву за предоставленные образцы и результаты верификации методики прямым весовым методом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фуалков А.С.* Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект-пресс, 1997. 718 с.
2. *Murugan P., Nagarajan R.D., Shetty B.H., Govindasamy M., Sundramoorthy A.K.* Recent trends in the applications of thermally expanded graphite for energy storage and sensors — a review // *Nanoscale Advances*. 2021. No. 3. P. 6294—6309.
3. *Tarannum F., Danayat S.S., Nayal A., Muthaiah R., Annam R.S., Garg J.* Large enhancement in thermal conductivity of solvent-cast expanded graphite/polyetherimide composites // *Nanomaterials*. 2022. No. 12 (11). P. 1877.
4. *Исаев О.Ю., Смирнов Д.В., Пономарев А.А., Каменева А.Л., Шелемба И.С., Оглезнев А.А., Юдин Р.С.* Контроль состояния уплотнения из терморасширенного графита на базе оптоволоконных технологий // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20. № 4. С. 34—42.
5. *Ноздрихин А.Д., Черепанова М.В., Потапов И.С.* Увеличение термостойкости листового терморасширенного графита // *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. 2019. № 1. С. 83—92.
6. *Lee Y., Nithya S., Lee G.* Boost charging lithium-ion battery using expanded graphite anode with enhanced performance // *Materials Letters*. 2021. V. 299. P. 130077.
7. *Филимонов Д.А., Юдина Т.Ф., Базанов М.И., Братков И.В., Леонтьев Н.А.* Электрохимические свойства различных углеродных материалов. Расчет адсорбции кислорода // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 2. С. 20—22.
8. *Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Ливинцова М.Г.* Исследование процессов уплотнения порошков терморасширенного графита при прокатке // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2019. Т. 17. № 8. С. 366—370.
9. *Ноздрихин А.Д., Черепанова М.В., Потапов И.С.* Определение условий терморасширения ин-теркалированного графита в печи с электрообогревом // *Южно-сибирский научный вестник*. 2020. № 1 (29). С. 102—107.
10. *Бердников Р.А., Хименко Л.Л., Минченко Л.А., Ильин А.Н., Исаев О.Ю.* Влияние состава пиротехнической смеси на сорбирующую способность терморасширенного графита, полученного методом термоудара // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2022. № 71. С. 129—136.
11. *Яковлев А.В., Финаенов А.И., Забудьков С.Л.* Терморасширенный графит: синтез, свойства и перспективы применения // *Журн. прикладной химии*. 2006. Т. 79. С. 1761—1771.
12. *Каллаев С.Н., Бакмаев А.Г., Бабаев А.А., Билалов А.Р., Омаров З.М., Теруков Е.И.* Теплофизические свойства терморасширенного графита // *Теплофизика высоких температур*. 2022. Т. 60. № 1. С. 19—22.
13. *Berestneva Yu.V., Raksha E.V., Voitash A.A., Arzumanyan G.M., Savoskin M.V.* Thermally expanded graphite from graphite nitrate cointercalated with ethyl formate and acetic acid: morphology and physicochemical properties // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1658. P. 012004.
14. *Иванов А.В., Павлова Ю.А., Максимова Н.В., Похолок К.В., Малахо А.П., Авдеев В.В.* Получение терморасширенного графита, модифицированного ферритом магния // *Неорганические материалы*. 2018. Т. 54. № 7. С. 668—674.
15. *Белова М.Ю.* От «черного мела» к уплотнениям из ТРГ // *Арматуростроение*. 2008. № 1 (52). С. 42—49.
16. *Гревнов Л.М., Оглезнева С.А., Куликова А.А.* Исследование легирования порошковых сталей разными формами углерода // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 11. С. 284—288.
17. *Huang J., Zhao Z.Q., Chen T., Zhu Y., Lv Z.H., Gong X., Niu Y.Y., Ma B.G.* Preparation of highly dispersed expandable graphite/polystyrene composite foam via suspension polymerization non-covalently compatibilized by polystyrene with enhanced fire retardation // *Carbon*. 2019. V. 146. P. 503—512.
18. *Wei B., Zhang L., Yang S.* Polymer composites with expanded graphite network with superior thermal conductivity and electromagnetic interference shielding performance // *Chemical engineering journal*. 2021. V. 404. P. 126437.
19. *Jaszak P.* Modeling of the elastic properties of compressed expanded graphite — a material used in spiral wound gaskets // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020. V. 187. P. 104158.
20. *Mohanty S., Nayak S.K.* A new way synthesis of expanded graphite as a thermal filler to enhance the thermal conductivity of dgeba resin as thermal interface material // *High performance polymers*. 2020. V. 5. P. 506—523.

21. *Glebova N.V., Krasnova A.O., Nechitailov A.A.* Thermally expanded graphite as functional material in the technology of electrode material with mixed conductivity // Russian journal of applied chemistry. 2018. 91 (V. 8). P. 1262—1271.
22. *Берестнева Ю., Войташ А., Ракиа Е., Балкушкин Р., Межевова А., Савоськин М.* Оценка возможности применения терморасширенного графита для очистки загрязненных природных вод // Химическая безопасность. 2021. Т. 5. № 1. С. 110—124.
23. *Китова А.Е., Медведева А.С., Быков А.Г., Колесов В.В., Решетилов А.Н.* Биосенсор на основе мембранных фракций *glucanobacter oхudans* модифицированный терморасширенным графитом // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2019. № 3. С. 63—69.
24. *Стручкова Т.С., Нюрова А.Г., Николаева А.Д.* Исследование влияния терморасширенного графита на триботехнические характеристики политетрафторэтилена // Южно-сибирский научный вестник. 2019. № 4 (28). С. 303—306.
25. *Попов М.В., Брестер А.Е., Юсин С.И., Баннов А.Г.* Исследование пористых углеродных материалов для суперконденсаторов // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29. № 6. С. 691—701.
26. *Ракиа Е.В., Глазунова В.А., Осколкова О.Н., Сухов П.В., Волкова Г.К., Давыдова А.А., Берестнева Ю.В., Савоськин М.В.* Углеродные наночастицы на основе терморасширенного графита: влияние способа получения ТРГ на морфологию частиц // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2021. № 13. С. 777—787.
27. *Караваев Д.М., Матыгуллина Е.В., Сиротенко Л.Д., Дегтярев А.И.* Определение коэффициента трения композиционного материала на основе терморасширенного графита с кремнийорганическим связующим // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2 (4). С. 775—778.
28. *Chung D. L.* A review of exfoliated graphite // Journal of Materials Science. 2016. V. 51. No. 1. P. 555.
29. *Bogdan O.P., Muravieva O. V., Zlobin D. V.* Acoustic Density Testing of Blanks Made of Thermally Expanded Graphite // AIP Conference Proceedings. Proceeding of the 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. 2020. С. 040008.
30. *Bogdan O.P., Zlobin D. V., Muravieva O. V., Muraviev V. V., Volkova L. V.* Acoustic and Eddy Current Methods of Nondestructive Testing of Thermally Expanded Graphite Sheets // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. С. 012033.
31. *Артемов А.В., Васильев С.Л., Юргенсон С.А., Кулаков В.В., Авдеев В.В.* Исследование макро-структуры углеродных фрикционных материалов методом рентгеновской томографии // Цветные металлы. 2012. № 12. С. 64—68.
32. *Богдан О.П., Муравьева О.В., Платунов А.В., Рысев Д.С.* Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 2. С. 61—68.
33. *Bogdan O.P., Zlobin D.V., Muravieva O.V., Molin S.M., Platonov A.V.* Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method // Приборы и методы измерений. 2021. Т. 12. № 1. С. 58—66.
34. *Князьков Н.Н., Шарфарец Б.П.* Акустика пористо-упругих насыщенных жидкостью сред (обзор теории БИО) // Научное приборостроение. 2016. Т. 26. № 1. С. 77—84.

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭХОСИГНАЛОВ ОТ НЕСПЛОШНОСТЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕДУР СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ БЕТОННЫХ СВАЙ ИМПАКТ-МЕТОДОМ

© 2023 г. Е.Г. Базулин^{1,*}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 09.06.2023; после доработки 10.07.2023
Принята к публикации 13.07.2023

Для контроля бетонных свай применяют импакт-метод, который позволяет регистрировать эхосигналы от подошвы сваи и от отражателей в ней. Однако разрешающая способность измеренного эхосигнала недостаточно высокая, чтобы уверенно разделять отраженные импульсы и определять их фазу. Применение метода максимальной энтропии (МЭ) позволило повысить разрешающую способность эхосигналов, полученных импакт-методом в бетонной свае длиной 3000 мм, примерно в три раза и уверенно идентифицировать эхосигналы от искусственных отражателей как в виде диска толщиной 100 мм, так и в виде параллелепипеда высотой 300 мм. Применение метода Compressive Sensing (CS) позволило повысить разрешающую способность этих же эхосигналов примерно в десять раз. Основной проблемой успешного применения методов МЭ и CS является определение импульсного отклика бетонной сваи при ударе. Предложен способ оценки импульсного отклика по обрабатываемому эхосигналу.

Ключевые слова: контроль бетонных свай, импакт-метод, сверхразрешение, метод максимальной энтропии, метод Compressive Sensing.

DOI: 10.31857/S0130308223080043, EDN: DYWNSA

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе строительства очень важным является этап изготовления свайных полей. В настоящий момент времени процент использования свай заводского изготовления уменьшается. Это связано с тем, что при забивке свай в грунт из-за больших вибраций возможны аварии и разрушения окружающей застройки. Более безопасным методом возведения свайных оснований за счет минимизации вибрационного воздействия является технология погружения свай вдавливанием [1]. В этом случае в грунте подготавливают скважину, устанавливают арматурный каркас и заполняют скважину бетонной смесью. Так как бетонная смесь оказывается в грунте до начала своего твердения, то она подвержена воздействию большого количества факторов, которые могут привести к появлению дефектов в теле бетонной сваи, что в итоге может оказать негативное влияние на устойчивость возводимого сооружения. Это обстоятельство накладывает особые требования на контроль бетонных свай.

В настоящее время разработано множество методов контроля свай, основанных на различных физических принципах. Параллельный сейсмический метод представляет собой скважинные испытания для определения длины свайного фундамента и для обнаружения дефектов [2, 3]. Для проведения испытаний необходимо пробурить вспомогательную скважину близко к испытываемой свае на глубину не менее чем на 3000 мм ниже ожидаемой длины сваи. Приемник, перемещающийся по вспомогательной скважине, регистрирует продольные и/или поперечные волны, распространяющиеся вдоль тела сваи, после ударного воздействия по любой ее части. Точность определения длины сваи при помощи данного метода оценивается как 5 % [4]. Однако из-за бурения вспомогательной скважины и сканирования приемником данный метод является трудоемким.

Метод односкважинного ультразвукового каротажа разработан для оценки сплошности железобетонных свайных фундаментов. По трубке доступа, заполненной водой и прикрепленной к арматурному каркасу, для регистрации эхосигналов сканируют источник и приемник звука. Трубка доступа должна быть изготовлена из полимерного материала, так как при использовании металлических трубок, могут возникать значительные реверберационные помехи, затрудняющие интерпретацию измеренных сигналов [5]. Недостаток метода заключается в трудоемкости установки трубки доступа до момента бетонирования сваи.

Межскважинный ультразвуковой метод разработан для оценки длины и сплошности буровых и буронабивных свай. Для его реализации нужно две трубки доступа, заполненные водой, для

перемещения источника и приемника звука. Анализ скорости и затухания ультразвуковых волн, которые распространяются между трубками доступа, позволяет делать выводы о наличии аномалий в контролируемой свае [6]. По трудоемкости межскважинный ультразвуковой метод сложнее метода односкважинного ультразвукового каротажа.

Метод межскважинной ультразвуковой томографии применяется в нефтяной и инженерной геофизике для изучения характеристик массивов горных пород. Его можно использовать и для контроля сплошности бетонных свай [7, 8]. Эхосигналы вокруг интересующей области измеряются для множества комбинаций расположения источника и приемника. Недостаток метода заключается в большом объеме измеренных эхосигналов при сканировании излучателем и приемником по двум трубкам доступа. Однако такой подход позволяет получать наиболее достоверную информацию о характере аномалий в бетонной свае.

На практике применяются несколько электромагнитных методов, предназначенных для контроля железобетонных конструкций, например, скважинная георадиолокация, импульсная рефлектометрия, метод сопротивлений [9, 10]. Один из таких методов используется для определения глубины заложения свайного фундамента и основан на измерении магнитного поля, возбуждаемого током, проходящим по стальным элементам сваи [11]. Датчик напряженности магнитного поля перемещается во вспомогательной скважине рядом со сваем. При нахождении датчика у подошвы сваи напряженность магнитного поля будет значительно снижена, что и используется для определения ее длины. Сложность контроля заключается в трудоемкости процесса бурения вспомогательной скважины и необходимости сканирования датчиком напряженности магнитного поля.

Радиометрический метод гамма—гамма предназначен для контроля сплошности свайных фундаментов и основан на количестве регистрируемых частиц в единицу времени приемным элементом, перемещающимся по трубке доступа. Принцип действия метода основан на измерении интенсивности обратного рассеяния от материала вокруг трубки доступа, которая зависит от плотности материала сваи [12]. Ограничения метода заключаются в контроле небольшого участка сваи вокруг трубки доступа и в невозможности локализовать несплошность — ее можно только обнаружить. Кроме того, работа с гамма-излучением создает дополнительную опасность для рабочих на стройке.

Все перечисленные выше методы достаточно трудоемки при подготовке и проведении контроля большого количества свай при строительстве, поэтому задача разработки простого и эффективного метода контроля бетонных свай является актуальной задачей.

Для контроля бетонных свай можно использовать импакт-метод [13, 14], который достаточно прост в реализации. Нужен молоток для удара по оголовку сваи и достаточно простой прибор с пьезоэлектрическим преобразователем, установленным на оголовке сваи, для регистрации эхосигнала [15]. Однако разрешающая способность эхосигналов может оказаться очень низкой для выделения эхосигналов от отражателей и даже от подошвы сваи. Для повышения эффективности обработки эхосигналов, полученных импакт-методом, в статьях [16, 17] для анализа фазы эхосигналов было предложено применять вейвлет-анализ.

Повышение частоты возбуждающего импульса, с одной стороны, повышает разрешающую способность эхосигналов, но, с другой стороны, уменьшает амплитуду эхосигналов из-за возросшего затухания. Для повышения разрешающей способности низкочастотных эхосигналов, полученных импакт-методом, можно воспользоваться методами сверхразрешения: методом максимальной энтропии (МЭ) [18] или методом распознавания со сжатием (Compressive Sensing, CS) [19, 20]. С их помощью можно в несколько раз повысить разрешающую способность эхосигнала.

В 1948 г. К. Шеннон [21] использовал понятие энтропии для оценки объема информации сообщения, состоящего из конечного набора символов алфавита. В текстовом сообщении заключен максимальный объем информации, если за любым знаком в сообщении может появиться с одинаковой вероятностью любой знак алфавита. С комбинаторной точки зрения, такое сообщение позволяет ограниченным набором символов алфавита создать максимальное количество разных сочетаний. С точки зрения повышения разрешающей способности, применение в качестве регуляризирующего функционала энтропии позволяет перенести поиск решения на множество эхосигналов, в которых за любым отсчетом может следовать отсчет с любым значением, т.е. ограничение на крутизну фронта решения эхосигнала снимается. Так, при обычной деконволюции фронта сигнала практически не меняется, т.е. за буквой «ь» никогда не появится буква «ъ», но после регуляризации крутизна фронта может возрасти — за буквой «ь» может появиться любая буква, в том числе и «ъ».

Метод распознавания со сжатием основан на понятии разреженного сигнала. Это означает, что измеренный эхосигнал, состоящий из сотен или тысяч отсчетов, порожден сигналом, в котором от нуля отличны несколько десятков отсчетов. Это приводит к тому, восстановленный сигнал будет иметь вид набора δ -функций, т.е. будет обладать свойством сверхразрешения. Изящная геометрическая интерпретация работы метода CS приведена в работе [16].

Одна из проблем применения методов сверхразрешения заключается в получении информации об импульсной характеристике системы, т.е. нужно знать форму эхосигналов от отражателей на разных глубинах. Если форма отраженного импульса зависит от глубины, то при наличии информации о характере его изменения, применение методов сверхразрешения вполне эффективно [22]. Существуют методы слепой деконволюции, которые позволяют получать информацию об импульсном отклике системы, не измеряя его. Эти методы применяются при обработке изображений с целью устранения эффекта неизвестного смещения камеры [23] или в сейсмоакустике при обработке эхосигналов [24].

2. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки работы метода МЭ и CS было проведено простейшее моделирование. На рис. 1а показан отклик системы в виде импульса с центральной частотой 1,2 КГц, временем нарастания и спада импульса 1250 мкс. Полагалось, что в свае длиной 3000 мм и скоростью звука 4 мм/мкс на расстоянии 1000 мм есть отражатель, порождающий импульс амплитудой $-0,4$. Импульс на оголовке сваи имеет амплитуду 1, однократно отраженный от подошвы сваи — $0,8$, а двукратно отраженный — $0,6$. На рис. 1б показан рассчитанный эхосигнал, на котором импульсы от отражателя не видно из-за большой длительности отклика. Вертикальными линиями черного цвета показаны времена прихода трех первых импульсов.

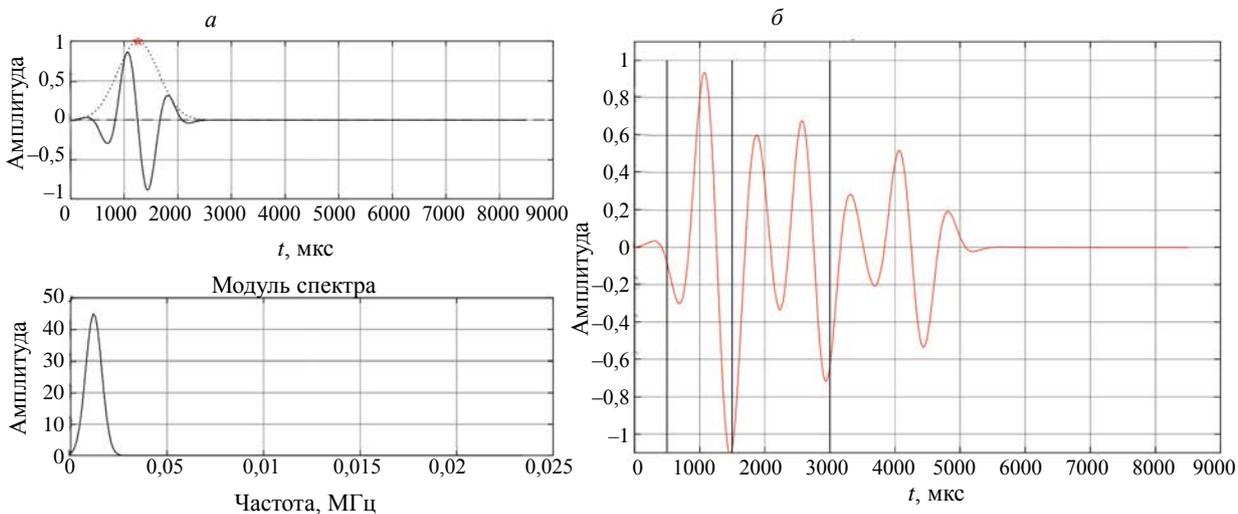


Рис. 1. Импульсный отклик системы (а) и смоделированные эхосигналы (б).

На рис. 2а показан результат обработки рассчитанного эхосигнала методом МЭ, а рис. 2б — методом CS. На рисунках графиком красного цвета показан исходный сигнал, а графиком черного цвета — сигнал после применения процедур достижения сверхразрешения. Видно, что два метода при выборе оптимальных параметров и при известном импульсном отклике системы хорошо разрешили все четыре импульса с сохранением информации об их фазе. Разрешающая способность после применения метода МЭ возросла примерно в три раза, а после применения метода CS более чем в десять раз. Такое существенное повышение разрешающей способности объясняется тем, что при расчетах был точно известен импульсный отклик системы и отношение сигнал/шум было высоким [25]. Следует отметить, что после проведения процедуры разрешения амплитуды бликов отличаются от заданных при расчете примерно на 20 %.

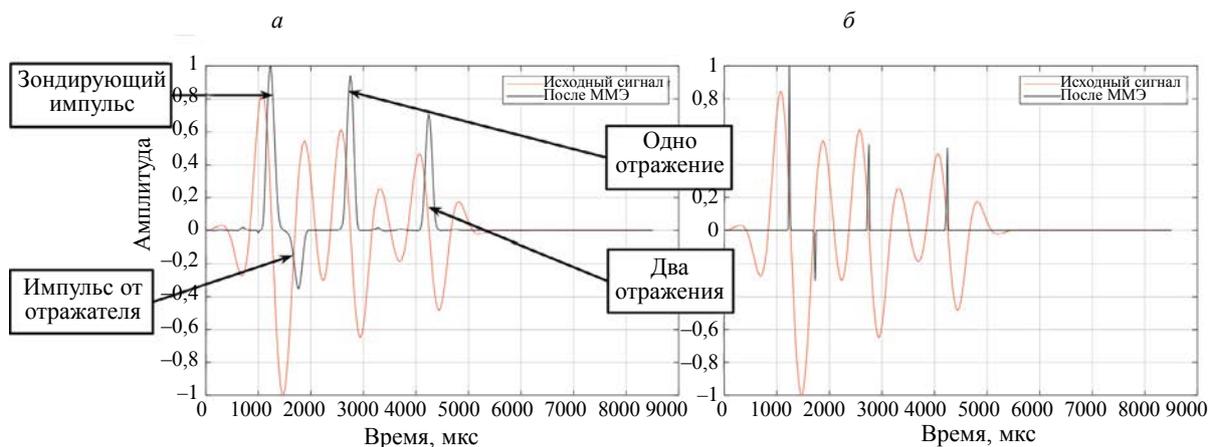


Рис. 2. Результат обработки рассчитанного эхосигнала методом МЭ (а) и методом CS (б).

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В работах [16, 26] подробно описаны условия измерения эхосигналов в модельных экспериментах, результаты обработки которых приведены в данной статье. Для подготовки испытательных образцов (свай) были изготовлены арматурные каркасы длиной 3000 мм, состоящие из шести продольных стержней арматуры диаметром 18 мм. Внутренний диаметр каркаса равен 250 мм. Внутри арматурного каркаса при помощи вязальной проволоки закреплялись отражатели (рис. 3), выполненные из полистирола. Проводилось бурение скважины, размещение в ней арматурного каркаса и бетонирование скважины. При изготовлении свай их длина и местоположение отражателей тщательно не контролировалось, особенно в области подошвы, так как изначально не предполагалось, что измеренные эхосигналы будут обрабатываться методами достижения сверхразрешения. Ударным источником при проведении испытания являлся молоток с резиновой насадкой, а эхосигналы регистрировались прибором «Спектр 4.0» [15].

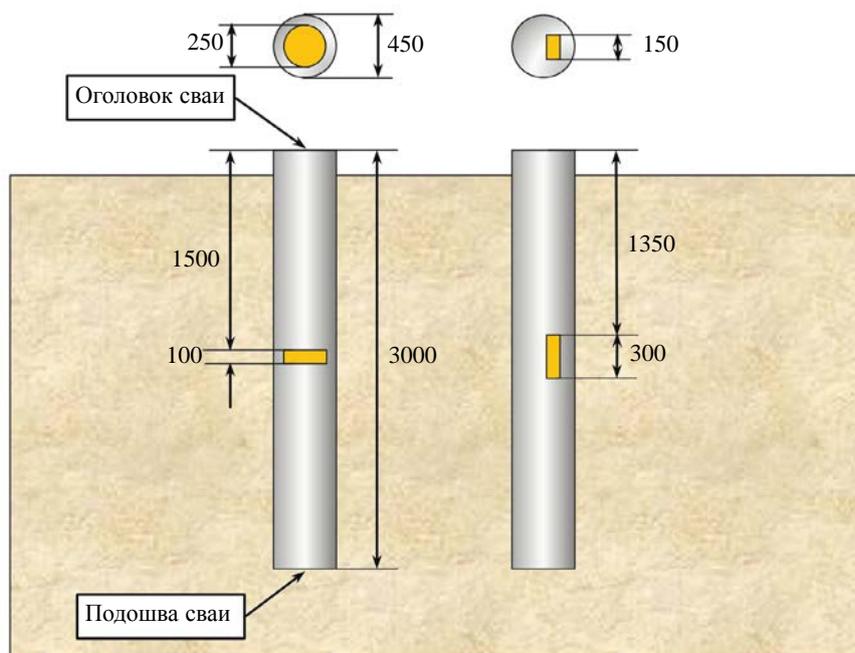


Рис. 3. Геометрические характеристики монолитных железобетонных свай: свая с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной 100 мм (а); свая с искусственным дефектом 100×150×300 мм (б).

Специфика решаемой задачи не позволяет выделить из измеренного экосигнала один импульс и полагать его равным импульсному отклику системы, что обычно можно сделать в ультразвуковой дефектоскопии на мегагерцовых частотах и толщинах объектов контроля более 10 мм. При обработке экосигналов, измеренных в модельных экспериментах, использовался следующий прием. Предполагалось, что отраженные импульсы имеют Гауссоподобную форму с неизвестными частотой, временем нарастания и спада и с нулевой фазой. Спектр измеренного экосигнала имеет сильно изрезанный спектр из-за наличия множества импульсов на временной апертуре. Импульсным откликом полагался такой Гауссоподобный сигнал, спектр которого был максимально близок к спектру измеренного сигнала. Такой подход оправдал себя при обработке экосигналов, полученных в модельном эксперименте (рис. 4а). Косвенным признаком правильно выбранного импульсного отклика служит то обстоятельство, что импульсы на оголовке сваи и от ее подошвы после применения процедур сверхразрешения должны выглядеть максимально похожими на дельта-импульсы.

3.1. Свая без дефектов

На рис. 4а показана оценка импульсного отклика (частота 0,825 КГц, длина импульса $(2,12 + 1,82)$ мс), а на рис. 4б представлен исходный экосигнал (график красного цвета) и результат применения метода МЭ (график черного цвета), что позволило повысить разрешающую способность примерно в три раза. Самый первый ложный импульс связан с тем, что экосигнал измерялся не с нулевого момента времени. Между первым и вторым импульсом появилась область, на которой можно будет заметить экосигналы от отражателей в свае. Импульс на рис. 4а достаточно хорошо совпадает с импульсным откликом сваи.

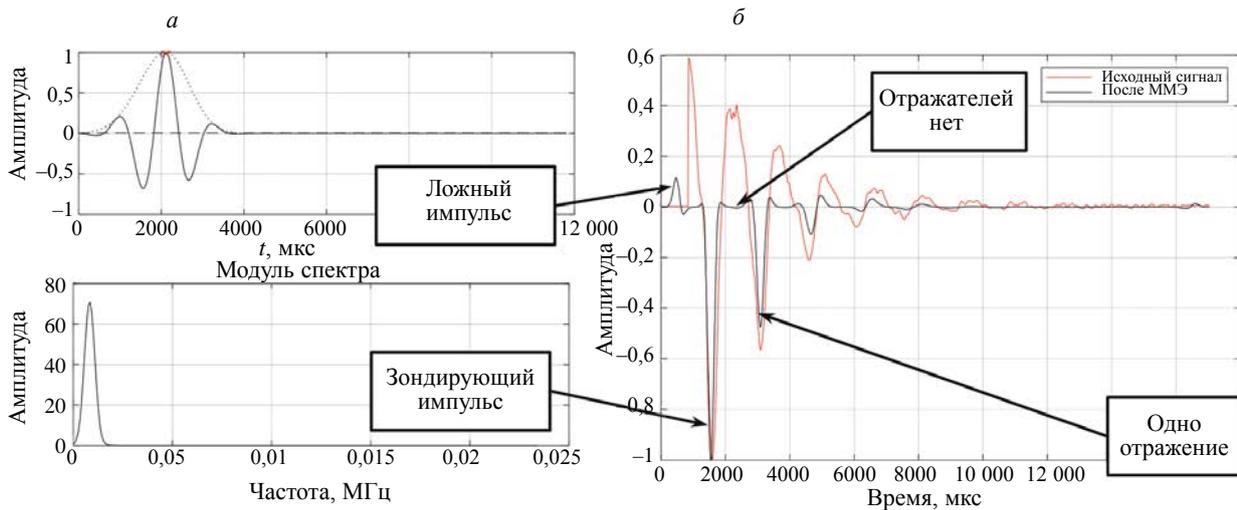


Рис. 4. Импульсный отклик системы (а) и результат применения метода МЭ (б).

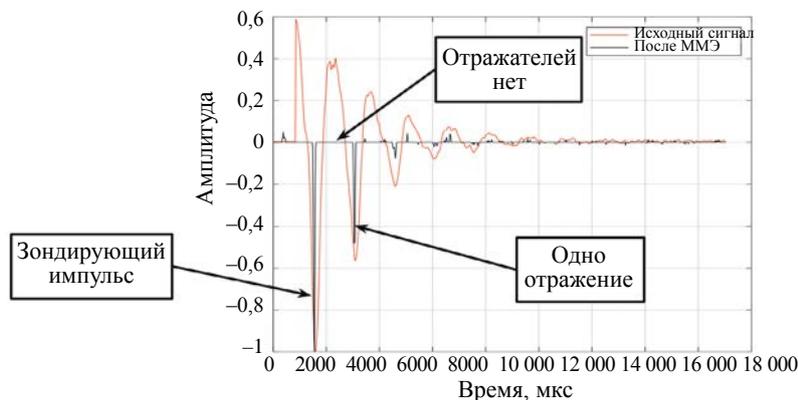


Рис. 5. Результат применения метода CS.

На рис. 5 показан исходный эхосигнал (график красного цвета) и результат применения метода CS (график черного цвета). Разрешающая способность возросла примерно в десять раз, что заметно больше по сравнению с методом МЭ (см. рис. 2б). Между зондирующим импульсом и первым отраженным нет импульсов, так как свая бездефектная. Импульсы на оголовке сваи и от ее подошвы после применения метода CS выглядят как дельта-импульсы. Подобные результаты были получены при обработке нескольких измерений.

3.2. Свая с отражателем в виде диска толщиной 100 мм

На рис. 6а показан исходный эхосигнал (график красного цвета) и результат применения метода МЭ (график черного цвета), увеличивший разрешающую способность примерно в три раза. На рис. 6а стал заметен эхосигнал от диска в середине сваи на «прямом луче» и при двух- и трехкратном отражении от концов сваи. Важно то, что эхосигнал от диска имеет противоположную фазу по отношению к импульсам, отраженным от концов сваи [14]. На рис. 6б красным цветом показаны исходные эхосигналы, а черным — результат обработки методом CS. Разрешающая способность возросла примерно в десять раз, что заметно больше по сравнению с методом МЭ (см. рис. 6а). Но даже при таком повышении разрешающей способности на рис. 6б разрешить эхосигналы, отраженные от краев диска, не удается. Подобные результаты были получены при обработке нескольких измерений.

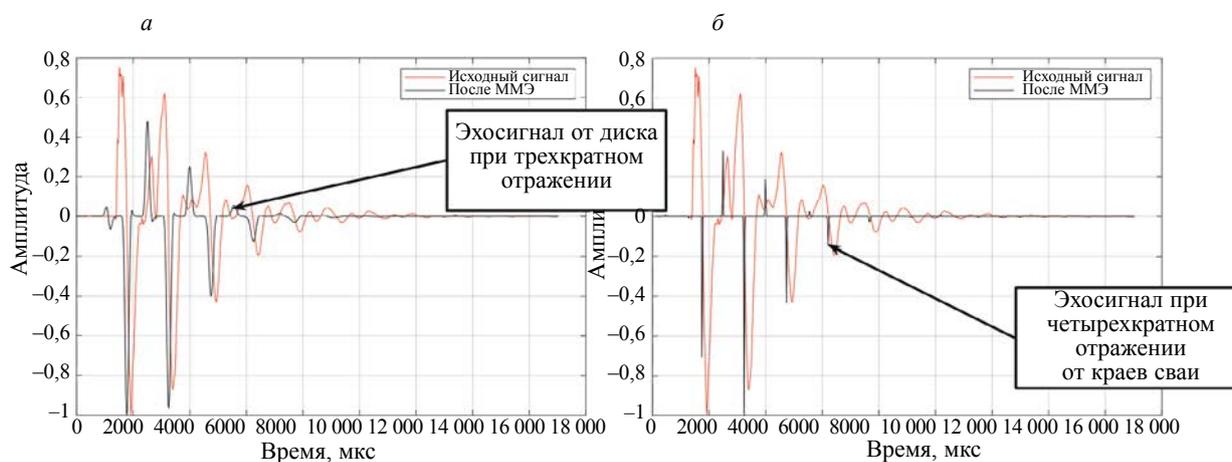


Рис. 6. Результат обработки экспериментального эхосигнала методом МЭ (а) и методом CS (б) при отражении от диска толщиной 100 мм.

3.3. Свая с отражателем в виде параллелепипеда высотой 300 мм

На рис. 7а показан исходный эхосигнал (график красного цвета) и результат применения метода МЭ (график черного цвета). Разрешающая способность эхосигнала возросла примерно в три раза и стал заметен импульс от параллелепипеда в середине сваи даже при двукратном отражении от концов сваи. Как и на рис. 6а, эхосигнал от параллелепипеда имеет противоположную фазу по отношению к импульсам, отраженным от концов сваи. На рис. 7б красным цветом показаны исходные эхосигналы, а черным цветом — результат обработки методом CS. Разрешающая способность возросла примерно в десять раз, что заметно больше по сравнению с методом МЭ (см. рис. 7а). И в этом случае разрешить эхосигналы, отраженные от краев параллелепипеда высотой 300 мм, не удастся. Близкие результаты были получены при обработке нескольких измерений эхосигналов.

3.4. Определение скорости и глубины залегания отражателей

Скорость продольной волны в бетонной свае длиной 3000 мм можно определить, измерив время задержки между зондирующим импульсом и импульсом, отраженным от подошвы сваи. В табл. 1 приведены результаты измерения скорости продольной волны в трех сваях, упомянутых в разделах 3.1, 3.2 и 3.3. В свае без дефекта и с отражателем в виде диска (см. рис. 3а) скорости продольной

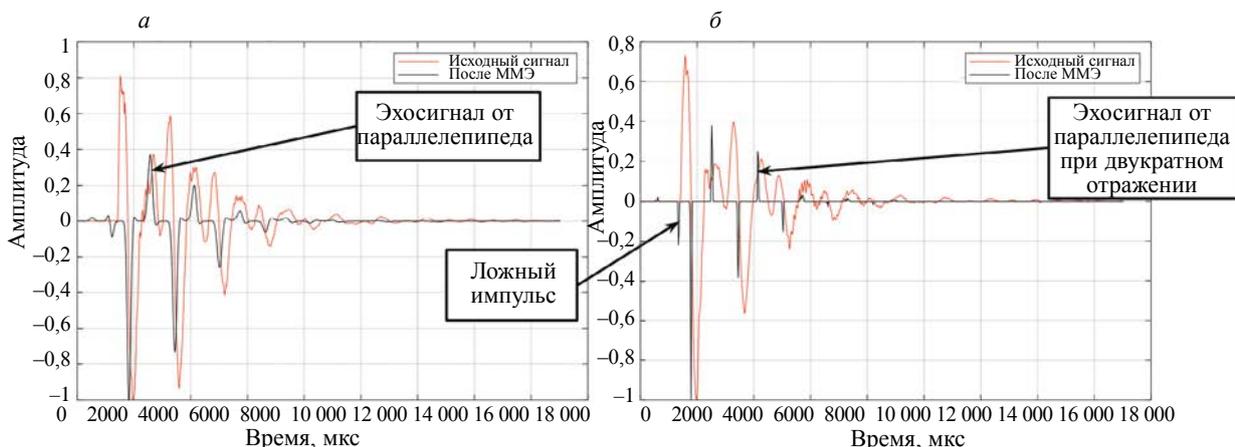


Рис. 7. Результат обработки экспериментального эхосигнала методом МЭ (а) и методом CS (б) при отражении от параллелепипеда высотой 300 мм.

Таблица 1

Результаты измерения скорости в сваях и расстояния до отражателя

	Скорость звука, мм/мкс		Расстояние до отражателя, мм	
	МЭ	CS	МЭ	CS
Свая без дефектов	3,96	3,96		
Свая с отражателем в виде диска	4,02	4,02	1500	1500
Свая с отражателем в виде параллелепипеда	3,61	3,66	1385	1403

волны отличаются друг от друга на 1,5 %. А вот отличие скорости продольной волны в свае с параллелепипедом (см. рис. 3б) составляет заметно большее значение $\approx 7,9$ %. Такое отличие измерений можно объяснить тем, что длина сваи с отражателем в виде параллелепипеда оказалась больше чем 3000 мм, или отличием условий изготовления и затвердевания. Известная скорость звука и время задержки позволяют оценить расстояние до передней грани отражателя. Расстояние до отражателя в виде диска определено достаточно точно и равно 1500 мм для обоих методов сверхразрешения. А вот расстояние до отражателя в виде параллелепипеда в среднем можно оценить как 1400 мм, вместо 1350 по чертежу на рис. 3б. Причина такого отличия, возможно, кроется в неточном размещении параллелепипеда, в неточно определенной скорости продольной волны в свае или в неравномерной скорости звука вдоль сваи.

4. ВЫВОДЫ

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

– Применение метода МЭ позволило повысить разрешающую способность эхосигналов, полученных импакт-методом в бетонной свае длиной 3000 мм, примерно в три раза и обнаружить эхосигналы от искусственных отражателей в виде диска толщиной 100 мм и параллелепипеда высотой 300 мм. Разные фазы импульсов от краев сваи и от искусственного отражателя могут служить дополнительным признаком для его обнаружения.

– Применение метода CS позволило повысить разрешающую способность этих же эхосигналов примерно в десять раз.

– Основной проблемой успешного применения методов МЭ и CS является получение импульсного отклика бетонной сваи при ударе. Предложен способ оценки импульсного отклика по спектру обрабатываемого эхосигнала. Для более корректного решения этой проблемы можно воспользоваться методами слепой деконволюции.

Автор статьи выражает свою благодарность инженеру-исследователю Научного центра «Арктика» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II Е.С. Лосевой за постановку задачи и за предоставление для обработки эхосигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flynn K.N., McCabe B.A. Driven cast-in-situ piles installed using hydraulic hammers: Installation energy transfer and driveability assessment // *Soils and Foundations*. 2019. V. 59. No. 6. P. 1946—1959. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.09.003
2. Wightman W.E., Jalinoos F., Sirles P., Hanna K. Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. Federal Highway Administration, Lakewood, CO. Region 8, USA. 2004.
3. Niederleithinger E. Improved Parallel Seismic Technique for Foundation Assessment / SAGEEP 2005. Extended Abstracts, Atlanta, USA. 2005.
4. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию / Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
5. Palm M. Single-hole sonic logging. A study of possibilities and limitations of detecting flaw in piles. Master of Science Thesis, KTH, Stockholm, 2012.
6. Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов // *Геотехника*. 2018. Том X. № 5—6. С. 62—71.
7. Шишкина М.А., Фокин И.В., Тихоцкий С.А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии // *Технологии сейсморазведки*. 2015. № 1. С. 5—21.
8. Лозовский И.Н., Чуркин А.А. Контроль сплошности буронабивных свай методом межскважинной ультразвуковой томографии // *Транспортное строительство*. 2018. № 7. С. 6—9.
9. Капустин В.В., Хмельницкий А.Ю. Проблемы малоглубинной сейсморазведки и георадиолокации в составе инженерно-геологических изысканий. Применение волновых методов для неразрушающего контроля фундаментных конструкций / Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2013.
10. Квятковский Г.И. Метод сопротивления заземления в инженерной геофизике. М.: Недра, 1993. С. 90.
11. Amir J.M. Single-Tube Ultrasonic Testing of Pile Integrity / In Proceedings of the International Deep Foundations Congress 2002, Geotechnical special publication Orlando, Florida, USA. 2002.
12. Bateman R.M. Gamma—gamma density logs. Chapter 6. Elsevier, 2020. P. 93—105.
13. ASTM D5882-16. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. URL: <https://www.astm.org/d5882-16.html> (дата обращения 27.05.2023).
14. СТО ЭГЕОС 1—1.2—001—2017. Стандарт организации. Применение неразрушающего контроля сплошности свай сейсмоакустическим методом. URL: <https://aigeos.ru/wp-content/uploads/2020/03/1gt4-2019-muhin-aa-i-dr-tehnicheskie-standarty-1.pdf> (дата обращения 27.05.2023).
15. Прибор диагностики свай «Спектр 4.0». URL: <https://www.interpribor.ru/device-diagnostics-piles-spectrum-4> (дата обращения 27.05.2023).
16. Лозовский И.Н., Лосева Е.С., Сясько В.А. Фильтрация данных сейсмоакустического контроля сплошности свай с использованием непрерывного вейвлет-преобразования // *Контроль. Диагностика*. 2022. № 9. С. 36—45.
17. Loseva E.S., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A., Syasko V.A. Wavelet Analysis for Evaluating the Length of Precast Spliced Piles Using Low Strain Integrity Testing // *Applied Sciences*. 2022. № 12. P. 1—12. <https://doi.org/10.3390/app122110901>
18. Базулин Е.Г. Обработка TOFD-эхосигналов с целью достижения сверхразрешения // *Дефектоскопия*. 2021. № 5. С. 13—21.
19. Базулин Е.Г., Соколов Д.А. Восстановление ультразвуковых изображений отражателей по неполным данным методом распознавания со сжатием // *Акуст. журн.* 2019. № 4. С. 520—532.
20. Bazulin E.G. Applying Compression Recognition Method to Achieve Superresolution of Echo Signals // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 58. No. 5. P. 342—354. [Базулин Е.Г. Применение метода распознавания со сжатием для достижения сверхразрешения эхосигналов // *Дефектоскопия*. 2022. № 5. С. 24—36.]
21. Shannon C.R. A mathematical theory of communication // *Bell Systems Technical Journal*. 1948. V. 27. P. 379—423.
22. Базулин Е.Г., Вовк А.С. Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учётом переменной формы эхосигнала // *Научные труды МЭИ*. 2018. № 5. С. 111—119.
23. Miskin J., MacKay D.J.C. Ensemble Learning for Blind Image Separation and Deconvolution. In: Girolami M. (eds.) *Advances in Independent Component Analysis. Perspectives in Neural Computing*. Springer, London, 2000. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0443-8_7
24. Денисов М.С. Алгоритм устойчивой адаптивной сигнатурной деконволюции в технологиях сейсморазведки. URL: <http://www.geo-lab.ru/images/Publics/1.pdf> (дата обращения 27.05.2023).
25. Kozarev E.L. Shannon's superresolution limit for signal recovery // *Inverse Problems*. 1990. 6 (1). P. 55—76. DOI:10.1088/0266-5611/6/1/007
26. Лосева Е.С. Повышение достоверности сейсмоакустического контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах (диссертация). Санкт-Петербургский горный университет. 2023. С. 138.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ФАЗИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПОЛИМЕРАХ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ

© 2023 г. Сюнхуэй Цзоу¹, Вэйчэн Гао^{1,*}, Гозэн Лю¹

¹Технологический институт Харбина, Харбин, Китай
E-mail: *gaoweicheng@sina.com

Поступила в редакцию 11.05.2023; после доработки 28.06.2023
Принята к публикации 07.07.2023

Для исследования характеристик расслоения слоистых углепластиков в состоянии едва видимого ударного повреждения (ЕВУП) использовались испытания на низкоскоростное ударное воздействие (НСУВ) и неразрушающий контроль (НК). С помощью методов визуального контроля и контактных измерений были определены энергетические пороги для шести различных последовательностей укладки слоев в состоянии ЕВУП. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля с применением фазированных решеток использовались для количественной оценки величины повреждений расслоения с помощью различных параметров, включая площадь, форму и тенденцию к изменению величины расслоения. Кроме того, была проведена качественная оценка ударной вязкости слоистых пластиков путем анализа характерных форм повреждений расслаивания на различных образцах с целью выявления влияния последовательности укладки слоев. Результаты данного исследования показывают, что уменьшение углового разброса между соседними слоями и минимизация повторения одинаковых слоев позволяет уменьшить повреждение отслаивания. Кроме того, увеличение соотношения углов ± 45 и 0° позволяет повысить жесткость конструкции на изгиб. В частности, было показано, что метод ультразвукового неразрушающего контроля с применением фазированных решеток позволяет эффективно обнаруживать повреждения отслоения в ламинате в состоянии ЕВУП.

Ключевые слова: слоистые углепластики, низкоскоростные ударные повреждения, ЕВУП, ультразвуковой контроль фазированными решетками, последовательность укладки слоев.

DOI: 10.31857/S0130308223080055, EDN: DYZBRT

1. ВВЕДЕНИЕ

Полимеры, армированные углеродными волокнами (ПАУВ), широко используются в аэрокосмической отрасли, поскольку отвечают строгим техническим требованиям, предъявляемым к легким, долговечным, легкоформуемым, коррозионностойким и высокоэффективным конструкциям [1, 2]. Тем не менее в процессе эксплуатации или технического обслуживания углепластиковые конструкции подвержены падению инструмента, ударам града, птиц, столкновениям с обломками или другими летающими объектами [3]. Эти низкоскоростные ударные нагрузки могут нанести непоправимый ущерб композитным слоистым конструкциям, имеющим низкую внутри- и межслойную прочность, что представляет значительную угрозу безопасности полета самолета [4].

Едва видимое ударное повреждение (ЕВУП) привлекло внимание многих ученых благодаря своей скрытой форме [5—9]. Качественная идентификация повреждений расслоения в слоистых конструкциях, испытывающих ЕВУП, в настоящее время является основной задачей и проблемой неразрушающего контроля (НК) в области композитов. Известные методы НК для углеволоконных композитов включают инфракрасную термографию [10], рентгенографию [11], вихретоковый контроль [12] и ультразвуковой контроль [13]. Ультразвуковой контроль является наиболее распространенным методом неразрушающего контроля благодаря своей дешевизне, безопасности и способности проникать в различные материалы [14, 15].

Сложность многослойных конструкций из углепластика и окружающая среда создают значительные трудности для традиционных технологий ультразвукового контроля. Метод фазированных решеток предпочтительнее традиционных методов ультразвукового неразрушающего контроля благодаря более высокой эффективности обнаружения, более широкому диапазону охвата, лучшей чувствительности и более высокой надежности. Эта технология приобрела большую популярность среди инженеров и специалистов [16—18]. С помощью ультразвукового метода неразрушающего контроля с применением фазированных решеток во многих исследованиях изучалось влияние различных параметров, включая материалы волокон и матрицы [19], энергию удара [20], толщину ламината [21], внутрислойные включения [18] и форму ударного элемента [22], на повреждение внутреннего расслоения композитных ламинатов при низкоскоростном ударном нагружении. Сложность и хаотичность путей распространения повреждений в слоистом материале не позволяют полностью понять взаимосвязь между последовательностью укладки слоев и повреждением отслоения. Хотя

некоторые типичные слоистые материалы с однонаправленной укладкой, перекрестной укладкой и квазистатической укладкой [23—25] были предметом ограниченного числа исследований, посвященных последовательности укладки слоев, влияние изменения соотношения слоев на внутренние повреждения в композитных слоистых материалах получило меньшее внимание.

Исследование было начато с проведения испытаний на низкоскоростной удар шести углепластиковых слоев с различной последовательностью укладки слоев. Пороговые значения энергии для различных образцов в состоянии BVID определялись путем визуального осмотра и контактных измерений. Затем для исследования были выбраны три уровня энергии удара, которые удовлетворяли состояниям BVID для всех образцов. Уровни повреждения внутреннего расслоения углепластиковых слоев исследовались качественно и количественно с помощью ультразвукового метода неразрушающего контроля с применением фазированных решеток. Сравнивая форму, площадь и тенденцию изменения проекции расслоения, в данном исследовании было проанализировано влияние слоев $\pm 45^\circ$ и 0° на повреждение внутреннего расслоения. Также были объяснены причины увеличения площади расслоения. Кроме того, был проведен сравнительный анализ дефектов внутреннего расслоения слоистых композитов с нетрадиционным направлением укладки волокон.

2. НСУВ

2.1. Исследуемые образцы

Представленные образцы углепластиков, используемые в данном исследовании, включают в себя два основных типа: образцы со стандартными (обозначаются как T) углами укладки волокон 0° , $\pm 45^\circ$, 90° и образцы с нестандартными (обозначаются как NT) углами укладки волокон $\pm 22,5^\circ$, $67,5^\circ$, $112,5^\circ$. Размер каждого образца составляет 150×100 мм, толщина одного слоя — 0,187 мм. Всего для изготовления образца используется 20 слоев. В табл. 1 приведены сведения об используемых слоях и номера образцов. Приведены соотношения слоев, указывающие процентное соотношение слоев 0° , $\pm 45^\circ$ и 90° к общему количеству слоев, использованных в каждом образце (нетрадиционные образцы в обсуждение не включены). Размеры образцов и типичная последовательность укладки слоев композитных ламинатов показаны на рис. 1.

Таблица 1

Данные о компоновке образцов

Номер	Компоновка	Количество слоев	Толщина, мм	Соотношение слоев, %
T1	$[45/-45/90/45/-45/45/-45/0/45/-45]_S$	20	3,74	[10/80/10]
T2	$[45/-45/90/0/45/-45/45/-45/90/0]_S$	20	3,74	[20/60/20]
T3	$[45/0/-45/90/45/0/90/-45/90/0]_S$	20	3,74	[30/40/30]
T4	$[45/0/-45/90/45/0/-45/0/90/0]_S$	20	3,74	[40/40/20]
T5	$[45/90/-45/0/0/45/0/0/-45/0]_S$	20	3,74	[50/40/10]
NT	$[67,5/-22,5/112,5/67,5/-22,5/67,5/-22,5/22,5/67,5/-22,5]_S$	20	3,74	\

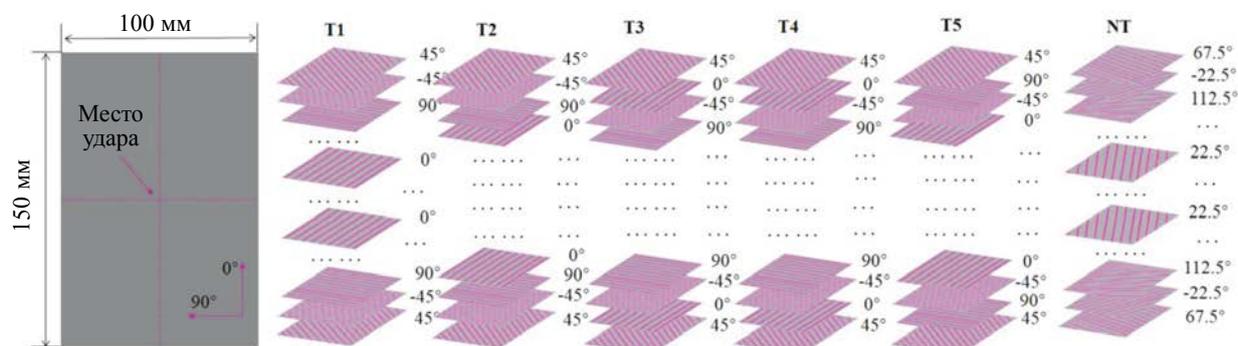


Рис. 1. Размеры образцов и типичная последовательность укладки слоев композитных ламинатов.

2.2. Методика эксперимента

Испытания состоят из двух основных частей. Первая часть включает в себя проведение испытания на НСУВ для определения порога повреждения ЕВУП-энергии. Вторая часть включает в себя использование метода ультразвукового неразрушающего контроля с применением фазированных решеток для определения повреждений внутреннего расслоения углепластиковых слоев в ЕВУП-состоянии.

Ударные испытания проводились на копере с падающим грузом Zwick HIT230F (рис. 2а), который состоит в основном из системы измерения нагрузки и перемещений, полусферического ударного элемента и вторичного противоударного устройства. Кроме того, система измерения нагрузки и перемещений включает датчики нагрузки, датчики перемещений и датчики скорости, которые способны регистрировать соответствующие кривые во время удара. Образцы, в соответствии с ASTM D 7136 [26], устанавливались на неподвижное основание с прямоугольным отверстием 125×75 мм, а четыре резиновых захвата ограничивали их движение во время удара (рис. 2б). Различные энергии удара достигались путем регулирования высоты падения молотка в процессе испытания. После ударного испытания обе стороны образца подвергались визуальному осмотру для выявления видимых повреждений. После этого на поверхности определялась зона повреждения с помощью цифрового глубинного микрометра с точностью ±0,001 мм (рис. 2в) и цифрового верньерного штангенциркуля с точностью ±0,03 мм (рис. 2г). С учетом упругой деформации измерения проводились каждые 6 ч, а окончательные значения фиксировались после достижения стабильности. Для проведения испытаний были выбраны семь различных уровней энергии удара: 20, 25, 30, 35, 40, 45 и 50 Дж. В дальнейшем для определения энергетического диапазона состояния ЕВУП использовались визуальный контроль, верньерный штангенциркуль и микрометрический контроль.

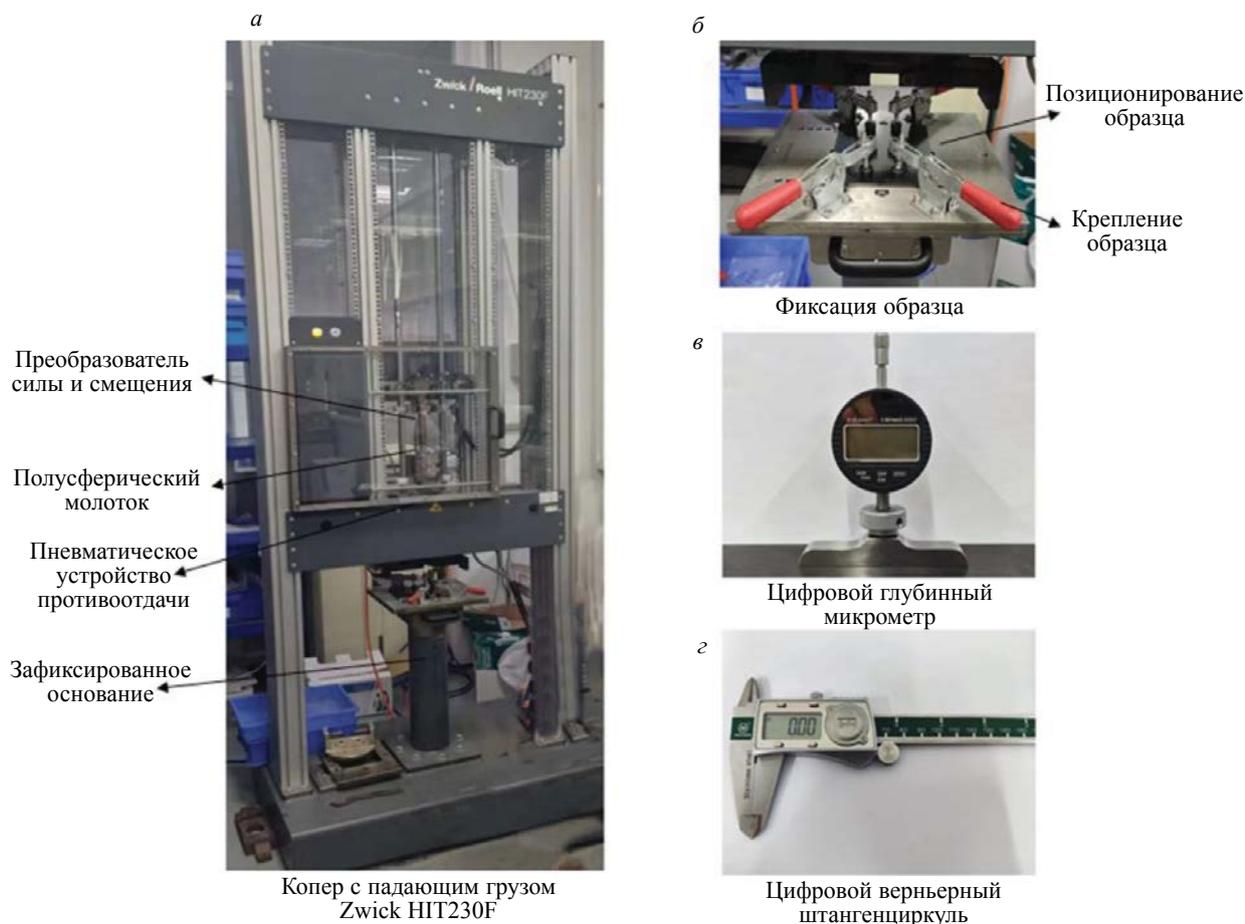


Рис. 2. Испытание на низкоскоростное ударное воздействие.

3. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

В ультразвуковом неразрушающем контроле с применением фазированных решеток ультразвуковые волны одновременно передаются на проверяемый образец через несколько элементов решетки с применением закона задержки и регистрацией результирующих эхосигналов. Эти сигналы анализируются с целью получения информации о разности времен, амплитуд и фаз. На основе этого анализа строится трехмерное изображение внутренних структур контролируемого объекта. Кроме того, данная технология позволяет определить местоположение расслоения внутри объекта. Это позволяет проводить качественный и количественный анализ дефектов.

Установка, реализующая ультразвуковой неразрушающий контроль (НК) с применением фазированных решеток, использованные в данном исследовании, представлен на рис. 3. В частности, использовался портативный ультразвуковой дефектоскоп Phasor XS с линейной фазированной решеткой, состоящей из 64 элементов (шириной 0,49 мм и расстоянием между центрами элементов двух соседних элементов 1 мм), с центральной частотой 5 МГц. Для минимизации эффекта ближнего поля и улучшения визуализации дефектов датчик был установлен под нулевым углом на прямоугольной призме толщиной 20 мм. Кроме того, для получения информации о положении зонда в направлении развертки использовался энкодер. Для предотвращения образования воздушных карманов между образцами и контактной поверхностью призмы, которые могут снизить затухание звукового луча и препятствовать беспрепятственному распространению ультразвуковых сигналов в образцах, применяется специальный контактный гель. Контактный гель также минимизировал трение и защищал как образцы, так и поверхность зонда.



Рис. 3. Установка для ультразвукового контроля фазированными решетками.

Для получения точной информации о дефектах необходимо провести калибровку скорости звука в образце до начала контроля. С этой целью для калибровки скорости звука была выбрана поверхность образца в неповрежденной области, удаленной от точки удара. Окончательно откалиброванная скорость звука составила 2700 м/с. В процессе контроля достаточно точно рассчитывался закон задержки, а в режимах линейной развертки и линейной фокусировки ультразвуковой фазированной системы проводилось продольное сканирование вдоль образца. При каждом сканировании задействовалось 16 элементов решетки с шагом 1, а глубина фокусировки была установлена на 3,5 мм, что позволило получить 49 сигналов А-скана без перемещения датчика. В каждой точке развертки отображаются амплитудно-временные кривые (или кривые толщины) для падающей волны, волны от дефекта и волны от нижней поверхности материала. Затем сигнал А-скана обрабатывается алгоритмом получения изображения С-скана, который позволяет получить информацию о форме и размерах дефектных участков в слоистых углепластиках.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Верификация достоверности контроля

Для обеспечения надежности и достоверности результатов испытаний из каждого типа образцов были сделаны три тестовых экземпляра под номерами 001, 002 и 003, которые подвергались воздействию одной и той же энергии удара. На рис. 4 и 5 показаны кривые истории отклика на удар и С-сканы повреждений при отслаивании образца Т1 при энергии удара 20 Дж для трех образцов. В случае низкоскоростного удара композит рассеивает кинетическую энергию ударного тела двумя основными способами (рис. 4б): один — это энергия, поглощенная различными механизмами повреждения (поглощенная энергия) и другой — энергия, возвращенная обратно к ударному телу в результате упругой деформации (упругая энергия). Эти два вида энергии получаются путем интегрирования кривой «нагрузка—перемещение» (рис. 4б) во время удара. Кроме того, методом ультразвукового неразрушающего контроля с фазированными решетками получен С-скан повреждения отслоения. Результаты показывают, что кривые «контактная сила—время», «контактная сила—смещение», «энергия—время» и размер участка расслоения имеют меньшую погрешность и меньший разброс при одинаковой энергии удара. Эти результаты подтверждают хорошую повторяемость и согласованность результатов испытаний. Следовательно, в последующем исследовании результаты испытаний не будут дублироваться.

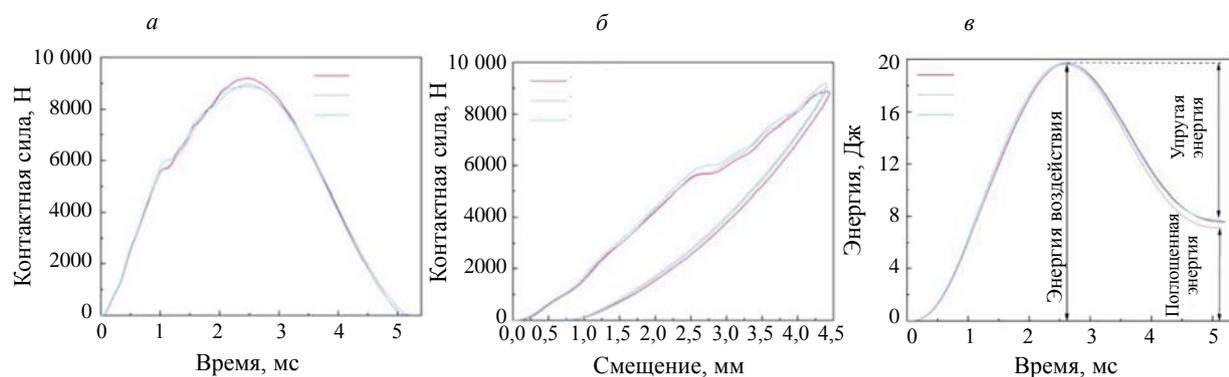


Рис. 4. История ударного отклика трех контролируемых экземпляров из образца Т2 при 20 Дж: кривые «контактная сила—время» (а); кривые «контактная сила—смещение» (б); кривые «энергия—время» (в).



Рис. 5. С-сканы повреждения расслоения.

4.2. Определение энергетического порога для состояния ЕВУП

На начальном этапе планирования эксперимента было выбрано семь значений энергии удара. Однако в ходе испытаний было обнаружено, что по мере увеличения энергии на передней и задней сторонах углепластиковых ламинатов появляются видимые трещины. Это визуально заметное повреждение, хотя и заслуживает внимания, меркнет по сравнению с угрозой безопасности, которую представляют собой едва заметные повреждения, что также негативно сказывается на проектировании и применении композитных конструкций. В связи с этим возникла необходимость в более

точном определении диапазона энергии удара для получения полного и наглядного представления о повреждении внутреннего расслоения визуалью малозаметных углепластиковых слоев. В данной работе состояние ЕВУП композитов описывается количественно двумя способами: во-первых, проводится визуальное поиск значительных вмятин или трещин на поверхности образцов (наблюдатель стоит на расстоянии примерно 30—50 см от поверхности образцов); во-вторых, используются цифровые микрометры и верньерные штангенциркули, чтобы убедиться, что глубина вмятин в зоне удара не превышает 0,5 мм.

Типичные едва видимые ударные повреждения (ЕВУП) и видимые ударные повреждения (ВУП) углепластиковых слоев представлены на рис. 6 и 7. Очевидно, что в отличие от ВУП образец в состоянии ЕВУП не имеет следов повреждений на поверхности, но при этом происходит его внутреннее расслаивание, что существенно влияет на несущие характеристики конструкции.



Рис. 6. Едва видимое ударное повреждение (ЕВУП).



Рис. 7. Видимое ударное повреждение (ВУП).

На рис. 8 показана динамика изменения глубины вмятины в зоне удара при различных последовательностях укладки слоев и значениях энергии удара. Образцы имеют схожие характеристики, причем увеличение глубины вмятины положительно коррелирует с энергией. До определенного значения энергии удара этот прирост невелик, а после него быстро увеличивается — явление, известное в литературе как «явление перегиба» [27]. Считается, что способность образца сопротивляться ударному разрушению меняется до и после этой точки. Примечательно, что до «точки

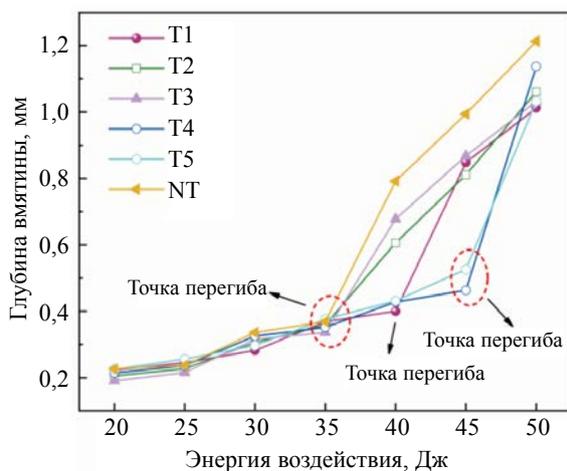


Рис. 8. Значение глубины вмятины для различных образцов при семи энергиях удара.

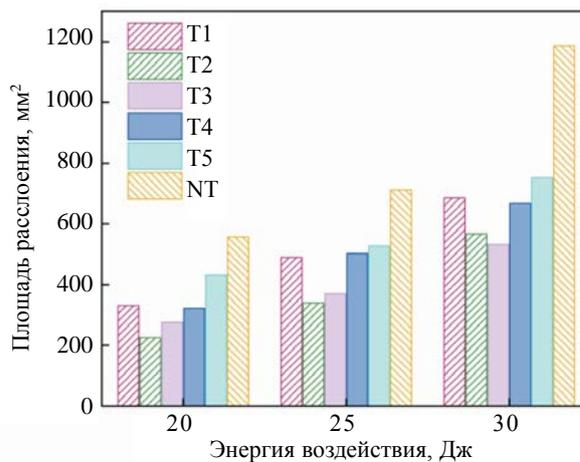


Рис. 9. Площадь расслоения у различных образцов в состоянии БВИД.

перегиба» глубина вмятины на поверхности образца составляет менее 0,5 мм, что соответствует состоянию ЕВУП, описанному в предыдущей работе. После «точки перегиба» глубина вмятины резко увеличивается, что свидетельствует о возникновении ВУП. В сочетании с результатами визуального контроля можно считать, что энергия при возникновении «точки перегиба» может быть использована в качестве порогового значения энергии для ЕВУП. Учитывая разницу в сопротивлении повреждению, вызванную изменением последовательности укладки слоев, для исследования влияния конфигурации укладки на повреждение внутреннего расслоения образцов были выбраны три энергии (20, 25 и 30 Дж).

4.3. Получение изображения межслойных повреждений в композитных углепластике с помощью С-сканирования

Механизм ударного разрушения композитных слоистых материалов при низкоскоростном ударе достаточно сложен: в нем участвуют комбинированные формы повреждений, на которые влияют как тонкий материал, так и макроструктура, изменяющаяся под действием нагрузки во времени и в пространстве. Изменение направления укладки волокон непосредственно влияет на общую жесткость слоистого материала, изменяя распространение волн ударных напряжений и вызывая различные режимы зарождения и распространения трещин в матрице. Это в дальнейшем влияет на процесс внутреннего расслаивания.

С-сканирование — это процесс отображения исходного сигнала, полученного портативным ультразвуковым дефектоскопом Phasor XS с фазированной решеткой, который представляется в виде цветowych изображений, отображающих информацию о различных уровнях проверяемого образца. А изображения С-скана представляют собой планарные картины, дающие информацию о форме и размерах плоскости дефекта. На рис. 10 показана проекция С-сканированного изображения повреждения внутреннего расслоения, полученного методом ультразвукового контроля фазированными решетками для шести типов слоистых пластиков при низкоскоростном ударном нагружении. Более темные цвета, расположенные ближе к центральной области изображения, свидетельствуют о более сильной отраженной энергии, что характеризует степень более серьезного повреждения. Кроме того, форма областей расслаивания существенно различается у образцов с разным порядком компоновки. Поэтому сравнение только по длине и ширине поврежденных участков не дает полного представления о реальных размерах повреждения. Для устранения этого недостатка область расслоения, представленная на С-скане рис. 10, была подвергнута дополнительной обработке для точного определения размеров области расслоения, как показано на рис. 9. Как видно из рисунка, область расслоения постепенно увеличивается по мере увеличения энергии.

Межслойные границы образцов Т1 и Т2 имели преимущественно угол $\pm 45^\circ$, в то время как остальные три типа образцов с обычной укладкой имели более равномерное расположение волокон. Для удобства сравнения образцы с обычной укладкой были разделены на две группы.

Результаты контроля повреждений поверхности показали, что образцы Т1 обладают более высоким пороговым значением энергии с точки зрения визуально видимого повреждения (точкой перегиба) по сравнению с образцами Т2, что свидетельствует о более высокой устойчивости образцов Т1 к деформации. С другой стороны, результаты ультразвукового контроля показали, что во всех трех случаях увеличения энергии удара площадь расслаивания образцов Т2 была меньше, чем образцов Т1, что свидетельствует о более высокой стойкости образцов Т2 к расслаиванию. Другими словами, увеличение доли слоев $\pm 45^\circ$ позволяет повысить жесткость слоистого пластика на изгиб, но это сопряжено с определенными издержками, поскольку увеличивает степень распространения межслойных повреждений. Увеличение степени повреждения при расслаивании в значительной степени связано с большей угловой разницей между границами 45° и -45° по сравнению с границами 0° и $\pm 45^\circ$ или 90° и $\pm 45^\circ$. Такая большая угловая разница обеспечивает больший потенциал для увеличения повреждений. Кроме того, в образцах Т1 и Т2 наблюдались значительные различия в форме проекций расслоения. При увеличении энергии форма проекции расслоения образцов Т1 менялась от неправильной круглой до неправильной эллиптической с направлением главной оси вдоль 0° . Образцы Т2, напротив, постоянно имели неправильную круглую форму. Это свидетельствует о том, что изменение последовательности укладки слоев влияет на реакцию ламината на ударные нагрузки.

Доля слоев с углом 0° увеличивалась на 10 % в каждом из оставшихся трех типов типовых образцов в порядке возрастания. Отсутствие достаточно качественных образцов не позволило авторам судить об энергетическом пороге состояния BVID образцов Т4 и Т5 только по результатам

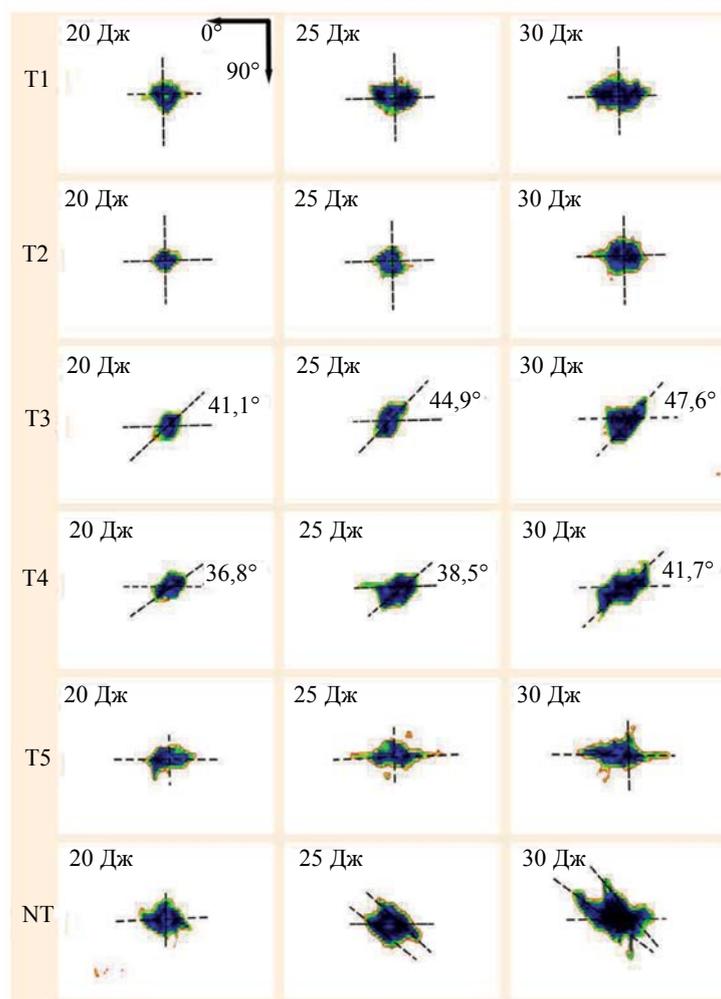


Рис. 10. Изображение С-скана повреждения расслоения.

поверхностного контроля повреждений. Однако, учитывая меньший энергетический порог образцов Т3, можно предположить, что увеличение доли слоев с углом 0° в определенной степени способствует улучшению жесткости многослойной структуры при изгибе. Результаты ультразвукового С-сканирования позволяют произвести более детальный анализ повреждений. В отличие от образцов Т1 и Т2, форма проекции расслоения образцов Т3, Т4 и Т5 была неправильной эллиптической для всех трех энергий удара. Примечательно, что направление проекции расслоения по главной оси также значительно изменяется при различных соотношениях слоев, уменьшаясь от почти 45° в начале до 0° в конце. Кроме того, площадь расслоения увеличивается по мере увеличения соотношения слоев в направлении 0° (см. рис. 10). Авторы определили, что увеличение площади расслоения отличается для образцов Т4 и Т5. Увеличение площади расслоения для образцов Т4 объясняется увеличением угла между границами 0° и 90° , что приводит к увеличению разницы между углами монослоев, аналогично ситуации с образцами Т2. Напротив, в образцах Т5 волокна укладывались с перекрытием в направлении 0° (см. табл. 1), что, согласно литературным данным [28], обычно не является причиной расслоения.

NT-образцы имеют большую площадь расслоения и более неправильную форму расслоения по сравнению со стандартными слоистыми образцами. Тем не менее использование нестандартных образцов при проектировании конструкций остается возможным. Хотя такие образцы открывают широкие возможности для проектирования, сложность и разнообразие их особенностей повреждения будут представлять большую сложность для специалистов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследованы возможности ультразвукового метода неразрушающего контроля с применением фазированных решеток для обнаружения и идентификации едва видимых ударных повреждений композитных слоистых материалов. Вначале были проведены испытания на низкоскоростное ударное воздействие на шести композитах с различной последовательностью укладки слоев. Формы повреждений на поверхности композита и глубина вмятин возле поверхности удара были проанализированы для определения пороговых значений энергии, при которых различные слои достигают состояния ЕВУП. Затем был проведен ультразвуковой неразрушающий контроль при трех более низких энергиях удара, которые удовлетворяли всем образцам, находящимся в состоянии ЕВУП. Результаты испытаний показали, что даже в состоянии ЕВУП низкоскоростной удар по-прежнему вызывает значительное внутреннее расслоение. Причем с увеличением энергии область расслоения становилась все более обширной и имела более сложную структуру.

Кроме того, было проведено исследование особенностей ударного воздействия на композит путем сравнения результатов повреждений при различной последовательности укладки слоев. Увеличение доли слоев ± 45 или 0° повысило жесткость композита на изгиб и в некоторой степени увеличило пороговое значение энергии состояния BVID. Однако увеличение доли слоев ± 45 и 0° привело к увеличению площади расслаивания. Увеличение межслоевой области зависит от двух причин. Во-первых, увеличение разности углов раздела между слоями (например, слои 45 и -45 , 0 и 90°) увеличивает вероятность распространения расслоения. Во-вторых, при перекрытии слоев в одном направлении (например, слои 0° и 0°) возникает значительная разница в жесткости между перекрывающимися и соседними слоями, что приводит к концентрации напряжений и вызывает сильное расслоение, которого необходимо избегать при проектировании конструкции. Изменение площади расслоения — не единственный фактор, влияющий на последовательность укладки слоев, он также существенно влияет на форму и направление распространения повреждений при расслоении. О сложности механизма ударного повреждения свидетельствует такое явление.

Таким образом, использование метода ультразвукового контроля фазированными решетками для оценки формы внутренних повреждений композитных пластин в состоянии ЕВУП является эффективным и надежным средством исследования характеристик повреждения углепластиков при низкоскоростном ударном воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mair R.I.* Advanced composite structures research in Australia // *Composite Structures*. 2002. V. 57 (1—4). P. 3—10.
2. *Georgiadis S., Gunnion A.J., Thomson R.S.* et al. Bird-strike simulation for certification of the Boeing 787 composite moveable trailing edge // *Composite Structures*. 2008. V. 86 (1—3). P. 258—268.
3. *Pai Y., Pai K.D., Kini M.V.* A review on low velocity impact study of hybrid polymer composites // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 46. P. 9073—9078.
4. *Ali M., Joshi S.C.* Impact Damage Resistance of CFRP Prepreg Laminates with Dispersed CSP Particles into Ply Interfaces // *International Journal of Damage Mechanics*. 2012. V. 21 (8). P. 1106—1127.
5. *Goossens S., Berghmans F., Sharif Khodaei Z.* et al. Practicalities of BVID detection on aerospace-grade CFRP materials with optical fibre sensors // *Composite Structures*. 2021. V. 259. P. 113243.
6. *Chen F., Yao W., Jiang W.* Experimental and simulation investigation on BVID and CAI behaviors of CFRP laminates manufactured by RTM technology // *Engineering Computations*. 2021. V. 38 (5). P. 2252—2273.
7. *Mustapha S., Ye L., Dong X.* et al. Evaluation of barely visible indentation damage (BVID) in CF/EP sandwich composites using guided wave signals // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. V. 76—77. P. 497—517.
8. *Wei L., Chen J.* An integrated modeling of barely visible impact damage imaging of CFRP laminates using pre-modulated waves and experimental validation // *Composite Structures*. 2023. V. 304. P. 116372.
9. *Thorsson S.I., Waas A.M., Rassaian M.* Low-velocity impact predictions of composite laminates using a continuum shell based modeling approach Part b: BVID impact and compression after impact // *International Journal of Solids and Structures*. 2018. V. 155. P. 201—212.
10. *Ciampa F., Mahmoodi P., Pinto F.* et al. Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components // *Sensors*. 2018. V. 18 (2). P. 609.
11. *Yu B., Blanc R., Soutis C.* et al. Evolution of damage during the fatigue of 3D woven glass-fibre reinforced composites subjected to tension–tension loading observed by time-lapse X-ray tomography // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. V. 82. P. 279—290.

12. Wang Z., Zhu J., Tian G. et al. Comparative analysis of eddy current pulsed thermography and long pulse thermography for damage detection in metals and composites // *NDT & E International*. 2019. V. 107. P. 102155.
13. Geng X., Zhang C., Zhou B. et al. Experiment and simulation for ultrasonic wave propagation in multiple-particle reinforced composites // *Ultrasonics*. 2023. V. 132. P. 106971.
14. Saito O., Sen E., Okabe Y. et al. Laser Wavelengths Suitable for Generating Ultrasonic Waves in Resin-Coated Carbon Fibre Composites // *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*. 2020. V. 3 (3). P. 031103.
15. Taheri H., Hassen A.A. Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic // *Applied Sciences*. 2019. V. 9 (8). P. 1628.
16. Cao H., Ma M., Jiang M. et al. Experimental Investigation of Impactor Diameter Effect on Low-Velocity Impact Response of CFRP Laminates in a Drop-Weight Impact Event // *Materials*. 2020. V. 13 (18). P. 4131.
17. Kamimura H.A.S., Wu S.-Y., Grondin J. et al. Real-Time Passive Acoustic Mapping Using Sparse Matrix Multiplication // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2021. V. 68 (1). P. 164—177.
18. Caminero M.A., García-Moreno I., Rodríguez G.P. et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites // *Composites Part B: Engineering*. 2019. V. 165. P. 131—142.
19. Cao H., Ma M., Jiang M. et al. Experimental Investigation of Impactor Diameter Effect on Low-Velocity Impact Response of CFRP Laminates in a Drop-Weight Impact Event // *Materials*. 2020. V. 13 (18). P. 4131.
20. Sadeghi M.Z., Nienheysen P., Arslan S. et al. Damage detection by double-sided ultrasonic assessment in low-velocity impacted CFRP plates // *Composite Structures*. 2019. V. 208. P. 646—655.
21. Wang X., He J., Guo W. et al. Three-dimensional damage quantification of low velocity impact damage in thin composite plates using phased-array ultrasound // *Ultrasonics*. 2021. V. 110. P. 106264.
22. Liu H., Liu J., Ding Y. et al. Effects of Impactor Geometry on the Low-Velocity Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composites: An Experimental and Theoretical Investigation // *Applied Composite Materials*. 2020. V. 27 (5). P. 533—553.
23. Lebaupin Y., Hoang T.-Q.T., Chauvin M. et al. Influence of the stacking sequence on the low-energy impact resistance of flax/PA11 composite // *Journal of Composite Materials*. 2019. V. 53 (22). P. 3187—3198.
24. García-Moreno I., Caminero M., Rodríguez G. et al. Effect of Thermal Ageing on the Impact Damage Resistance and Tolerance of Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Laminates // *Polymers*. 2019. V. 11 (1). P. 160.
25. Sebaey T.A., González E.V., Lopes C.S. et al. Damage resistance and damage tolerance of dispersed CFRP laminates: Design and optimization // *Composite Structures*. 2013. V. 95. P. 569—576.
26. ASTM D7136/D7136M-15 standard test method for measuring the damage resistance of a fibre-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event.
27. Chen P., Shen Z., Xiong J. et al. Failure mechanisms of laminated composites subjected to static indentation // *Composite Structures*. 2006. V. 75 (1—4). P. 489—495.
28. Fuoss E., Straznicky P.V., Poon C. Effects of stacking sequence on the impact resistance in composite laminates — Part 1: parametric study // *Composite Structures*. 1998. V. 41 (1). P. 67—77.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ДАТЧИК С МИНИАТЮРНЫМИ МАГНЕТОМЕТРАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ ПРОРЕЗЕЙ В СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

© 2023 г. Мохд Маварди Саари^{1,*}, Нурул А'ин Надзри¹, Мохд Ауфа Хади Путера Зайни¹, Мохд Херван Сулейман¹, Тошихико Кива²

¹Университет Малайзии, Паханг 26600, Малайзия

²Университет Окаямы, Окаяма 700-8530, Япония

E-mail: *mmawardi@ump.edu.my

Поступила в редакцию 25.03.2023; после доработки 09.06.2023

Принята к публикации 16.06.2023

Выявление параметров распространения трещин, например, их направления и глубины, является одним из важных аспектов в обеспечении безопасности и надежности стальных конструкций. В данном исследовании представлена разработка датчика для возбуждения круговых вихревых токов с использованием планарного дифференциального миниатюрного магнетометра для обнаружения вертикальных и горизонтальных прорезей. В датчике реализована методика возбуждения круговых вихревых токов, которая приводит к возникновению разнонаправленных вихревых токов в пластине из мягкой стали, а также используется схема для измерения тангенциального магнитного отклика. Рабочие параметры разработанного зонда были определены на основе линейного и двухмерного сканирования магнитного отклика, вызванного индуцированными вихревыми токами в образцах из низкоуглеродистой стали с различной ориентацией и глубиной искусственных прорезей. Результаты показали, что при различных ориентациях прорезей с помощью разработанного зонда была получена корреляция сигнала с глубиной прорези. Вертикальные и горизонтальные прорези можно было визуализировать по распределению магнитного поля, когда дифференциальная мнимая компонента имела лучшую чувствительность к обнаружению вертикальных прорезей, представленных измеренными сигналами от пика до пика. Контроль разнонаправленных прорезей показал, что ориентацию прорези можно оценить по картам магнитного отклика с пределом обнаружения 5 мм по длине прорези и 0,5 мм по ширине прорези соответственно.

Ключевые слова: прорезь, дефект, магнетометр, вихревые токи, низкоуглеродистая сталь.

DOI: 10.31857/S0130308223080067, EDN: DZEAFR

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы неразрушающего контроля (НК) широко используются при производстве, обработке и в процессе эксплуатации, а также при поиске неисправностей для обеспечения целостности и надежности продукции, контроля производственных процессов и поддержания постоянного уровня качества. В частности, для контроля стальных изделий были разработаны различные методы неразрушающего контроля для выявления дефектов в материалах, включая поверхностные, внутренние и с обратной стороны [1]. Среди методов неразрушающего контроля электромагнитные методы, основанные на индукции вихревых токов (ВТ), считаются перспективными для неразрушающего контроля стальных изделий, поскольку они безопасны, быстры, бесконтактны и выгодны при работе с проводящими материалами, такими как низкоуглеродистые стальные листы [2—4]. Метод ВТ доказал свою быстроту и эффективность в обнаружении таких дефектов, как усталостные трещины, включения, пустоты и коррозия в проводящих материалах [5—7]. Метод ВТ работает путем обнаружения магнитного отклика от искаженного вихревого тока, вызванного дефектами, при приложении изменяющегося во времени магнитного поля к проводящим образцам. В частности, дефекты, которые действуют как высокоомные барьеры, вызывающие возмущения потока вихревых токов, обнаруживаются и характеризуются на основе профиля измеренного распределения магнитного поля от векторов вихревых токов внутри образца [8].

В целом, на профиль распределения магнитного поля из-за наличия трещин/прорезей влияют в основном два фактора: i) направление и глубина проникновения индуцированного вихревого тока и ii) направление и конфигурация чувствительного магнитного датчика [9, 10]. Первый фактор влияет на степень искажения наведенного вихревого тока в зависимости от ориентации трещины/прорези относительно направления вихревого тока. В теории использования индукции вихревого тока было использовано несколько подходов для улучшения отношения сигнал/шум искаженного магнитного сигнала, вызванного трещиной/прорезью. О методах создания однородной индукции вихревого тока, таких как использование ортогонально расположенной катушки возбуждения, сообщалось в [9]. Возбуждающая катушка располагается перпендикулярно поверхности образца таким образом, чтобы индуцированные вихревые токи были равномерными со стороны катушки, об-

ращенной к поверхности образца, зеркально отражая ток, протекающий в возбуждающей катушке. По этой причине сигнал от искаженного вихревого тока из-за трещины/прорези будет значительным по сравнению с единообразным сигналом вихревого тока в области без дефектов.

Использование П-образного ярма также было описано во многих конструкциях вихрековых датчиков [1]. Такое П-образное ярмо в основном работает аналогично методу равномерного вихревого тока, где равномерный вихревой ток индуцируется между полюсами ярма. Магнитные датчики размещаются в центре между полюсами ярма, так что измененный сигнал вихревого тока из-за трещины/прорези может быть обнаружен с хорошей чувствительностью в области, где вихревой ток однороден. Однако, по сравнению с методом равномерного вихревого тока, такое П-образное возбуждающее ярмо может вызывать более сильный вихревой ток в меньшей зоне контроля из-за того, что полюса ярма непосредственно обращены к поверхности образца. Следует отметить, что оба метода предназначены для создания однородного однонаправленного вихревого тока в зоне контроля [11]. Использование метода однонаправленной индукции вихревого тока может привести к различной чувствительности обнаружения в зависимости от ориентации трещин/прорезей относительно вихревого тока [12].

Для обеспечения аналогичной чувствительности, которая не зависит от ориентации трещины/прорези, был предложен ортогональный П-образный датчик для возбуждения вихревого тока в двух направлениях, перпендикулярных друг другу [9]. Этот тип датчика обычно работает на одной частоте, но в разных фазах. Хотя этот тип датчика способен генерировать сильные однородные вихревые токи, использование ярма приводит к увеличению размеров датчика, что затрудняет применение этого типа датчика для контроля на малой площади.

Использование простой круговой катушки было стандартным способом конструирования вихрековых датчиков [2, 13]. Круговая катушка создает замкнутый вихревой ток в проводящем материале, т.е. разнонаправленные вихревые токи протекают в области, где трещина/прорезь любой ориентации может быть обнаружена по изменению магнитного поля. Этот подход хорошо подходит для применения в высокочастотных задачах, в которых для измерения искаженного сигнала вихревых токов можно использовать обычную катушку. Даже если измерительная катушка расположена в центре круговой возбуждающей катушки и находится под воздействием сильного возбуждающего поля, ее динамический диапазон рабочего поля не будет насыщен, обладая при этом высокой чувствительностью в высокочастотной области.

Для стали с высокими значениями магнитной проницаемости следует использовать возбуждающее поле низкой частоты, чтобы обеспечить большую глубину проникновения вихревых токов: $\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)}$ [14], где f , μ , σ — частота электромагнитного поля, магнитная проницаемость, электрическая проницаемость материала соответственно. Более того, поскольку применение обычной катушки в качестве датчика вихревого тока в низкочастотной области оказывается недостаточно эффективным, в вихрековом датчике используются другие чувствительные магнитные датчики, такие как анизотропный магниторезистивный (АМР) датчик [15, 16], датчик на основе гигантского магниторезистивного эффекта (ГМР) [17] и сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД) [18]. Однако их типичный рабочий диапазон полей относительно мал, и сильное поле возбуждения легко насыщает датчик, если его поместить в центр катушки возбуждения. Сообщалось о нескольких подходах для разделения поля возбуждения и датчика, таких как изменение геометрии круговой катушки для формирования двойной D-образной, 8-образной катушки возбуждения [19, 20] и использование магнитных экранов для дополнительной изоляции датчика [21]. В конфигурации с двумя D-катушками датчик помещается между соседними D-образными катушками, где градиент и интенсивность поля возбуждения значительно уменьшаются в этой области. Однако оба подхода могут увеличить сложность конструкции при изготовлении датчика.

В данном исследовании рассматривается круговой вихрековый датчик с использованием миниатюрной дифференциальной конфигурации магнетометра для распознавания прорезей в нескольких направлениях. Круговая катушка является предпочтительной из-за ее простой конструкции при наведении вихревых токов в нескольких направлениях в зоне контроля. Кроме того, по сравнению с другими низкочастотными магнитными датчиками, для регистрации искаженного сигнала вихревого тока применяются миниатюрные магнитометрические датчики благодаря их высокой чувствительности и широкому динамическому диапазону поля. Метод подавления обратной связи на магнитных элементах позволяет эффективно расширить рабочий диапазон поля, а прогресс в производстве интегральных микросхем позволил создать более компактный магнитометрический датчик по сравнению с обычными громоздкими датчиками.

Статья построена следующим образом: в разделе 2 описаны моделирование и экспериментальные методы, использованные при исследовании схемы генерации вихревых токов, изготовлении датчика и экспериментальной установки для оценки параметров датчика. В разделе 3 представлены результаты моделирования для прорезей с различной ориентацией и их подтверждение в эксперименте с использованием изготовленного зонда. Показана и проанализирована корреляция сигналов при различной глубине и ориентации прорези. Раздел 4 завершает исследование.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

2.1. Конечно-элементное моделирование индукции круговых вихревых токов

Индукцированный вихревой ток J_s в проводящем материале, который протекает в плоскости xu из-за возбуждающего магнитного поля $B_0 e^{j2\pi ft}$, определяется по формуле:

$$J_s = J_{s0} e^{-(\pi f \mu \sigma)^{1/2} z} e^{j(2\pi ft + \alpha_0 - (\pi f \mu \sigma)^{1/2} z)}, \quad (1)$$

где μ , σ , J_{s0} и α_0 — магнитная проницаемость, электрическая проводимость образца, индуцированный ток и сдвиг фазы на поверхности соответственно. Следовательно, индуцируемый вихревой ток будет увеличивать вектор магнитного потенциала A в окружающей среде и может быть правильно описан в магнитодинамической модели следующим образом:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J_s. \quad (2)$$

Плотность магнитного потока B , генерируемого током, может затем быть рассчитан по $B = \nabla \times A$, а магнитная проницаемость μ описывается по нелинейной кривой $B-H$ стальной пластины. Затем магнитный отклик B от индуцированного вихревого тока может быть численно определен при расчете магнитного векторного потенциала A , исходя из трехмерного конечно-элементного моделирования возбуждающей катушки и стального образца.

Таблица 1

Параметры конечно-элементного моделирования

Параметры	Настройка
Модуль	AC/DC
Физическое поле	Magnetic Field, mf
Режим расчета	Frequency domain
Настройка данных	3D surface
Настройка графика отображения	Magnetic flux density norm, T
Катушка возбуждения	Количество витков: 100 Диаметр катушки: 15 мм Переменный ток: 1 А, 110 Гц
Стальная пластина	Электропроводность: $8,41 \times 10^6$ См/м Относительная магнитная проницаемость: 129 Размеры: 80×80 мм Толщина: 12 мм
Прорезь	Ширина: 1 мм Глубина: 10 мм Положение: поверхностная Форма: вертикальная, горизонтальная, 45° , крест и зигзаг

В данном случае, в программном обеспечении COMSOL (COMSOL, Швеция) разрабатывается трехмерная (3D) конечно-элементная (КЭ) модель, а результатом моделирования являются распределения индуцированных вихревых токов и магнитных полей. Сетчатая 3D-модель показана на рис. 1, а общие параметры моделирования перечислены в табл. 1. Моделирование вихревых токов проводилось при двух условиях: 1) образец без дефекта и 2) образец с прорезью в центре. Затем была получена разница сигналов при вычитании между этими образцами для оценки влияния ориентации/формы прорези на генерируемые распределения магнитного поля.

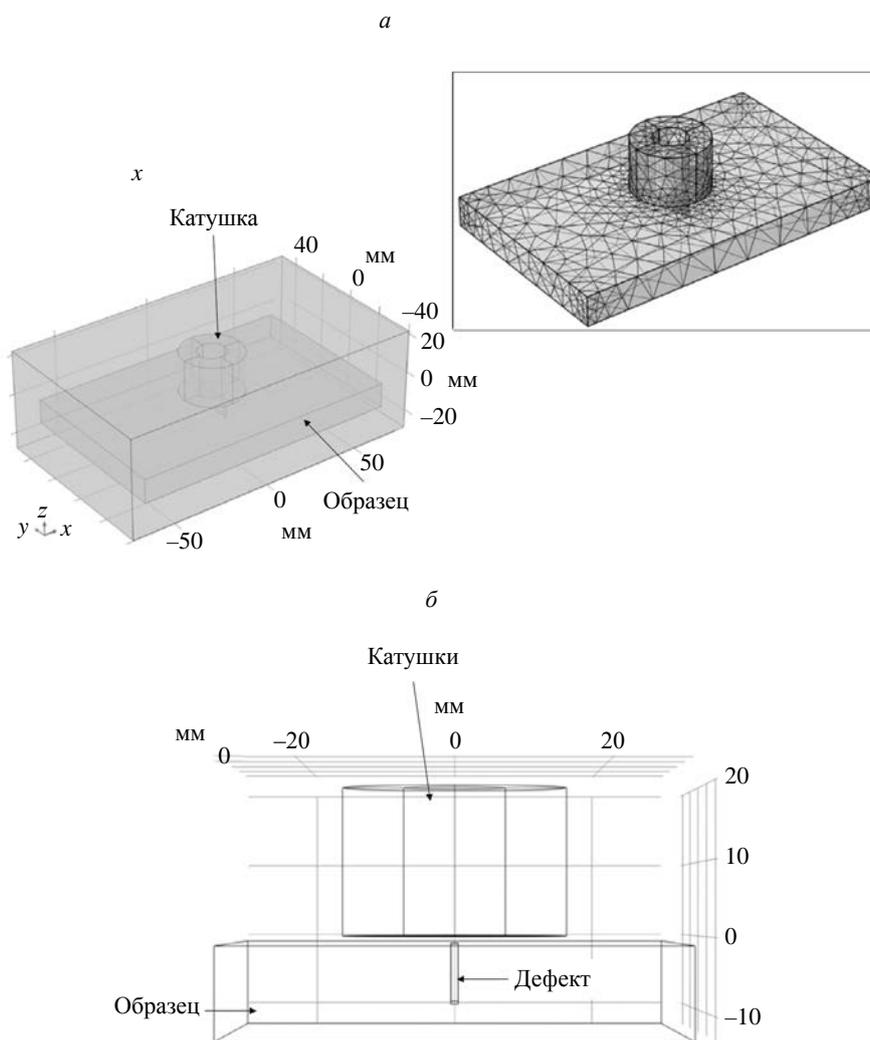


Рис. 1. 3D КЭ-модель, созданная в COMSOL, для циркулярного направления индуцированного вихревого тока: вид сверху (а); вид сбоку (б).

Поскольку целью моделирования является изучение эффективности кругового вихревого тока в обнаружении разнонаправленных прорезей, катушка возбуждения устанавливается неподвижной в центре образца в течение всего моделирования, а B_z рассчитывается на расстоянии 1 мм от поверхности образца в пределах области 30×30 мм. Были смоделированы и проанализированы пять прорезей: вертикальная, горизонтальная, 45° , крестообразная и z -образная. Вертикальная и горизонтальная прорези представляют собой прорезь, ориентированную в направлении x или y , и их ориентация ортогональна друг другу в плоскости контроля.

2.2. Разработка миниатюрных магнитометрических вихрековых датчиков

Измерительная система для разработанного кругового вихрекового датчика, представленная на рис. 2, состоит из круговой катушки возбуждения и магнитометрических датчиков (DRV425, Texas Instrument), источника напряжения, платы сбора данных и компьютера для обработки результатов измерений. Катушка возбуждения имела 100 витков и была намотана из медного провода диаметром 0,1 мм, а 2 магнитометрические датчики располагались в центре катушки. Размеры катушки и магнитометрических датчиков составляли 14 мм (внешний диаметр) и $4 \text{ мм} \times 4 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$ соответственно. Чувствительные элементы магнитометрических датчиков имели размеры $0,5 \text{ мм} \times 2 \text{ мм} \times 0,1 \text{ мм}$. Между магнитометрическими датчиками для формирования пло-

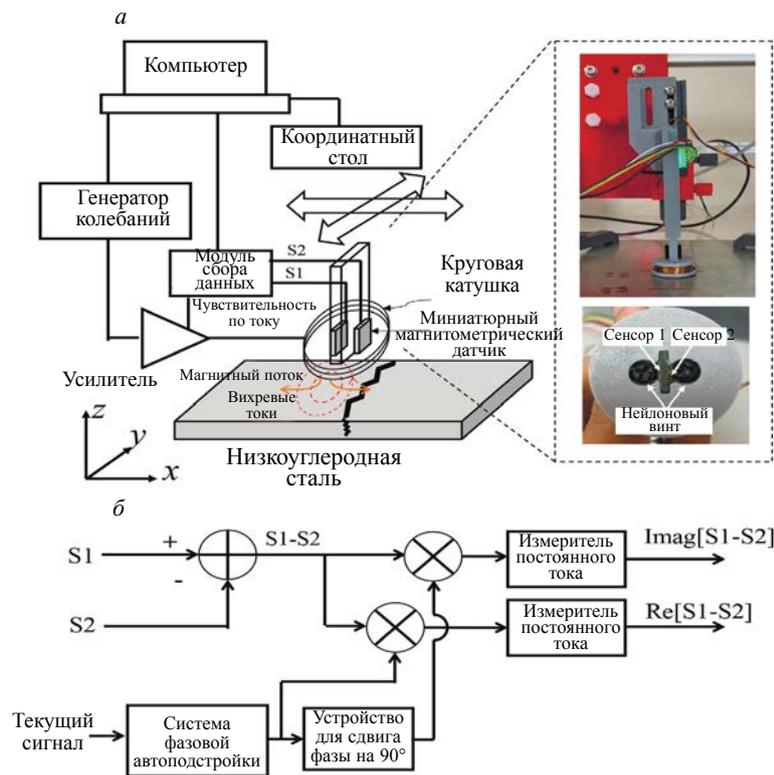


Рис. 2. Функциональная схема измерительной системы с вихретоковым преобразователем; нейлоновые винты М3 использовались, чтобы прикрепить возбуждающую катушку к корпусу датчика (а). Блок-схема фазочувствительной методики, реализованной на компьютере для разделения действительной и мнимой компоненты дифференциального сигнала (б).

скостной дифференциальной конфигурации датчика dB/dx имелся зазор 2 мм. Магнитометрический датчик имеет уровень собственных шумов, равный $1,5 \text{ нТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при 10 Гц в экранированной области при смещении на 5 В. Оцениваемая чувствительность составляет $30 \text{ мВ}/\text{мкТл}$ при шунтировании резистором с сопротивлением 200 Ом в линейном области $[-0,5 \text{ мТ}, 0,5 \text{ мТ}]$ [10]. Оценочная полоса пропускания магнитометрического датчика составляет около 17 кГц. Поскольку магнитометрический датчик не содержит никаких ферромагнитных материалов и имеет небольшие размеры, его вкладом в искажение магнитного отклика от образца можно пренебречь.

Исходя из планарной дифференциальной конфигурации, плотность тока в направлении y , J_y , может быть оценена следующим образом:

$$J_y \propto \frac{dB_z}{dx} \approx \frac{\Delta S_{\text{eddy}}}{\Delta x} = \frac{S_{1,\text{eddy}} - S_{2,\text{eddy}}}{\Delta x}, \quad (3)$$

Дифференциальный сигнал измеряется магнитометрическими датчиками S1 и S2 на базовой линии $\Delta x = 2 \text{ мм}$. Стоит отметить, что S1 и S2 также измеряют поле возбуждения и сильный сигнал намагниченности из-за высокой магнитной проницаемости образца. Затем дифференциальный сигнал разделяется на действительную и мнимую компоненты, используя сигнал тока в катушке возбуждения в качестве опорной фазы, как показано на рис. 2б. В низкочастотной области можно предположить, что сигналы намагниченности и возбуждающего поля находятся в фазе, и эти вклады сигнала следует учитывать при извлечении слабого сигнала вихревого тока при измерениях.

2.3. Образцы из низкоуглеродистой стали с искусственными прорезями

Низкоуглеродистая сталь SS400 — разновидность углеродистой стали с достаточно сильными ферромагнитными свойствами и широко используется в промышленности благодаря своей хоро-

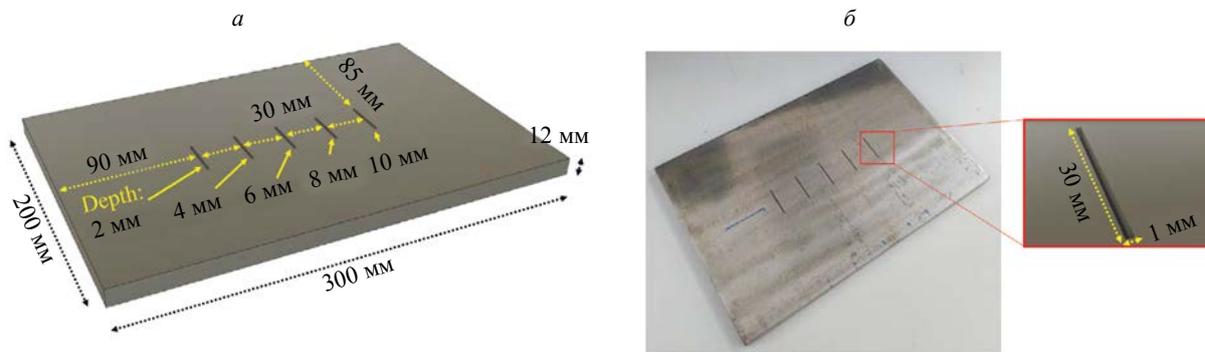


Рис. 3. Схематическое изображение образца из низкоуглеродистой стали толщиной 12 мм с глубинами прорезей от 2 до 10 мм (образец 1) (а); фотография образца 1 (б).

шей коррозионной стойкости. Для проверки эффективности метода индукции вихревого тока на 12-миллиметровых пластинах из стали SS400 методом электроэрозионной резки (ЭЭР) были подготовлены искусственные прорезы различной глубины и сложной формы. Относительная магнитная проницаемость и электрическая проводимость равны 500 и 2×10^6 С/м соответственно. Пять параллельных прорезей различной глубины показаны на рис. 3 (образец 1), а прорезь сложной формы, имитирующая форму трещины показана на рис. 4 (образец 2). Прорезы в образце 1 имели глубины 2, 4, 6, 8, 10 мм шириной 1, а прорезы во 2 образце имели постоянную глубину величиной в 10 мм с разными ширинами, длинами и ориентациями. Конкретные размеры показаны на рис. 3 для образца 1 и на рис. 4 и табл. 2 для образца 2.

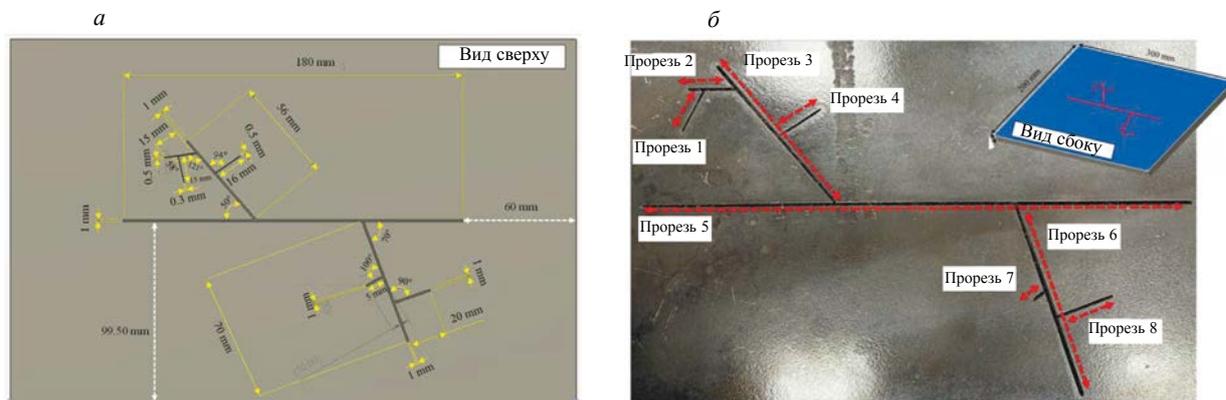


Рис. 4. Схематическое изображение искусственных прорезей с различными ширинами, длинами и ориентациями в интервале 0,2—1 мм, 5—180 мм, 0—290 град, соответственно на поверхности образца из низкоуглеродистой стали толщиной 12 мм (образец 2) (а); фотография образца 2 с соответствующими обозначениями прорезей (б).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. КЭ-моделирование индукции вихревых токов

Пять типов прорезей моделируются как поверхностные дефекты в стальных пластинах из стали SS400, и распределения магнитного поля по площади прорезей рассчитываются в рамках моделирования МКЭ. На рис. 5 показаны рассчитанные карты действительных и мнимых компонент нормального магнитного поля B_z , обусловленного вертикальными, горизонтальными, 45°, поперечными и z-образными прорезями после вычитания из данных по образцу без дефектов. Здесь катушка возбуждения располагается в точке (0, 0), т.е. в центре области щели, а B_z рассчитывается на рас-

Таблица 2

Параметры прорезей образца 2 и V_{pp} сигналы действительной и мнимой компонент S_1-S_2

Прорезь	Прорезь 1	Прорезь 2	Прорезь 3	Прорезь 4	Прорезь 5	Прорезь 6	Прорезь 7	Прорезь 8
Ориентация, град	247°	189°	130°	36°	0°	290°	210°	20°
Длина, мм	15	15	56	16	180	70	5	20
Ширина, мм	0,3	0,5	1	0,5	1	1	1	1
$V_{pp, фон} (Re[S_1-S_2])$, мВ	0,0020							
$V_{pp, прорезь} (Re[S_1-S_2])$, мВ	0,0003	0,0010	0,0044	0,0014	0,0034	0,0116	0,0005	0,0019
Результат контроля при использовании $Re[S_1-S_2]$: $V_{pp, прорезь} > 2 \times V_{pp, фон}$?	Нет	Нет	Да	Нет	Да	Да	Нет	Нет
$V_{pp, фон} (Imag [S_1-S_2])$, мВ	0,0006							
$V_{pp, прорезь} (Imag[S_1-S_2])$, мВ	0,0019	0,0006	0,0048	0,0022	0,0013	0,0053	0,0002	0,0014
Результат контроля при использовании $Imag[S_1-S_2]$: $V_{pp, прорезь} > 2 \times V_{pp, фон}$?	Да	Нет	Да	Да	Да	Да	Нет	Да

стоянии 1 мм от поверхности образца в пределах 30 мм×30 мм. Частота возбуждения установлена на 110 Гц на основе предыдущего исследования в [11], где можно получить оптимальный вклад компонентов утечки магнитного потока и вихревого тока для обнаружения щелей. Кроме того, частота возбуждения 110 Гц выбрана для обеспечения большей глубины проникновения вихревых токов, чтобы можно было оценить магнитный отклик от различных глубин щели по сравнению с традиционным подходом, использующим частоту возбуждения в области от 10 кГц до 1 МГц. Учитывая, что частота возбуждения составляет 110 Гц, глубина проникновения может быть рассчитана с использованием проводимости и проницаемости стали в табл. 1 как 1,46 мм, по сравнению с 0,15 мм, когда частота составляет 10 кГц. Более того, достаточная чувствительность для разрешения слабого магнитного отклика в низкочастотной области от образца может быть получена с помощью магнетометров по сравнению с обычным вихретоковым зондом, использующим катушку индуктивности в качестве датчика.

Карты распределения рассчитанных действительных и мнимых компонент B_z для всех типов прорезей показали изменение в интенсивности сигнала в местах расположения прорезей. Как действительная, так и мнимая компоненты принимали максимальное значение в тех местах расположения прорезей, где величина сигнала $Re[B_z]$ была примерно на порядок больше, чем $Imag[B_z]$. $Re[B_z]$ может рассматриваться как сигналы намагниченности и потока рассеяния на прорези и $Re[B_z]$ находился в фазе с током возбуждения. Из этого можно сделать вывод, что поток рассеивается больше всего в местах расположения дефектов, следовательно, показывая максимальное значение B_z . С другой стороны, $Imag[B_z]$ представлял сигнал, обусловленный вихревыми токами, и был меньше, чем сигнал намагниченности образца. Увеличение значения $Imag[B_z]$ вокруг мест расположения щелей свидетельствует о концентрации вихревых токов на краях щелей. Смоделированные значения $Re[B_z]$ и $Imag[B_z]$ показали, что метод индукции вихревых токов эффективен для геометрической оценки прорезей сложной формы. Однако следует отметить, что чувствительность в выявлении прорези, находящейся между большими прорезями, с помощью $Imag[B_z]$, как показано в случае прорези z-образной формы (рис. 5и, к), будет значительно снижена по сравнению с большими прорезями. Это связано с тем, что на циркуляцию вихревого тока сильно повлияли большие прорези, что привело к меньшему изменению интенсивности для центральной прорези.

В случае применения конкретного вихретокового датчика для получения “истинного” изменения вихретокового сигнала, вызванного дефектами, необходимо вычистить фоновые сигналы, например, от поля возбуждения и намагниченности. Обычно для этой цели используется дифференциальная конфигурация вихретоковых датчиков, где планарная дифференциальная конфигурация [11] эффективно уменьшает сильные фоновые сигналы в измеряемом сигнале.

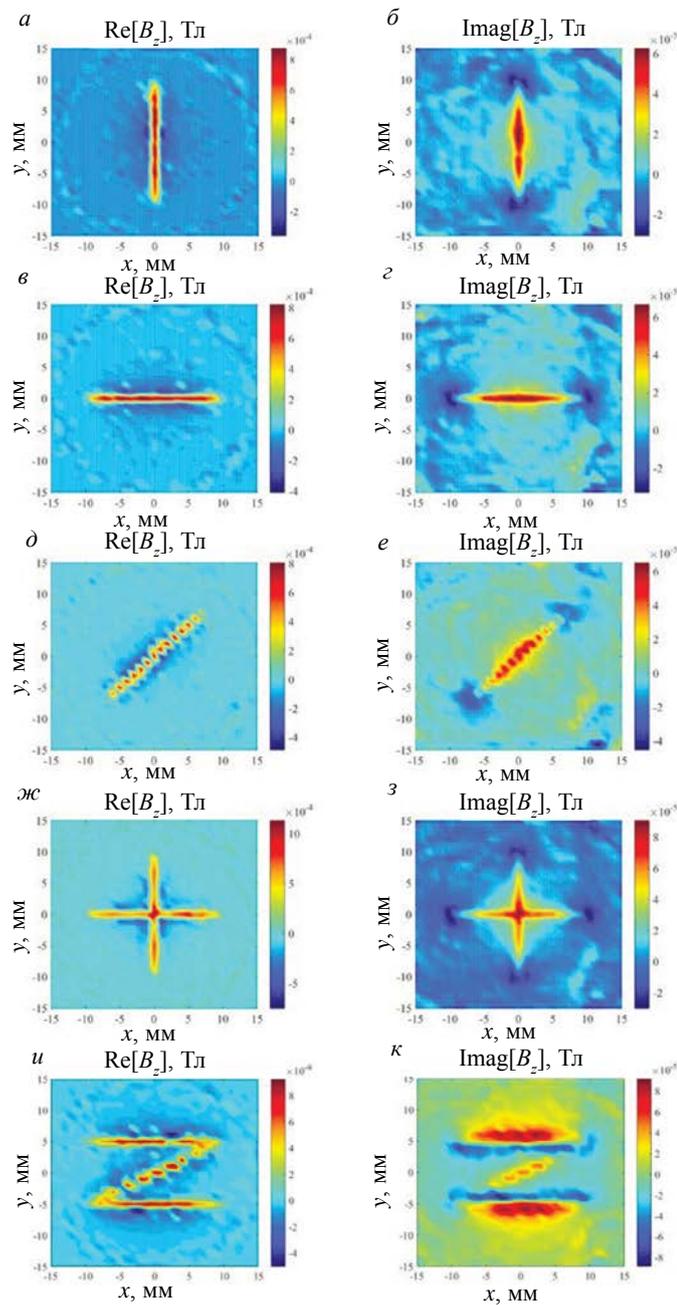


Рис. 5. Смоделированные распределения действительных и мнимых компонент магнитного поля B_z при частоте возбуждения 110 Гц для вертикального (*а*, *б*), горизонтального (*в*, *г*), 45° (*д*, *е*), крестообразного (*ж*, *з*), z -образного (*и*, *к*) типа прорези.

3.2. Оценка искусственных прорезей с помощью вихрекового датчика с миниатюрными магнетометрическими датчиками

На рис. 6*а*, *б* показаны двумерные скан-карты действительной и мнимой компонент магнитных откликов $\text{Re}[S_1 - S_2]$ и $\text{Imag}[S_1 - S_2]$ по поверхности образца 1, ориентированные так, чтобы получилась серия горизонтальных щелей. Измерения проводились при возбуждающем поле 110 Гц, амплитуде тока возбуждения 70 мА и расстоянии 1 мм от поверхности образца. Наличие горизонтальных щелей можно было определить по профилю изменения интенсивности сигнала. По

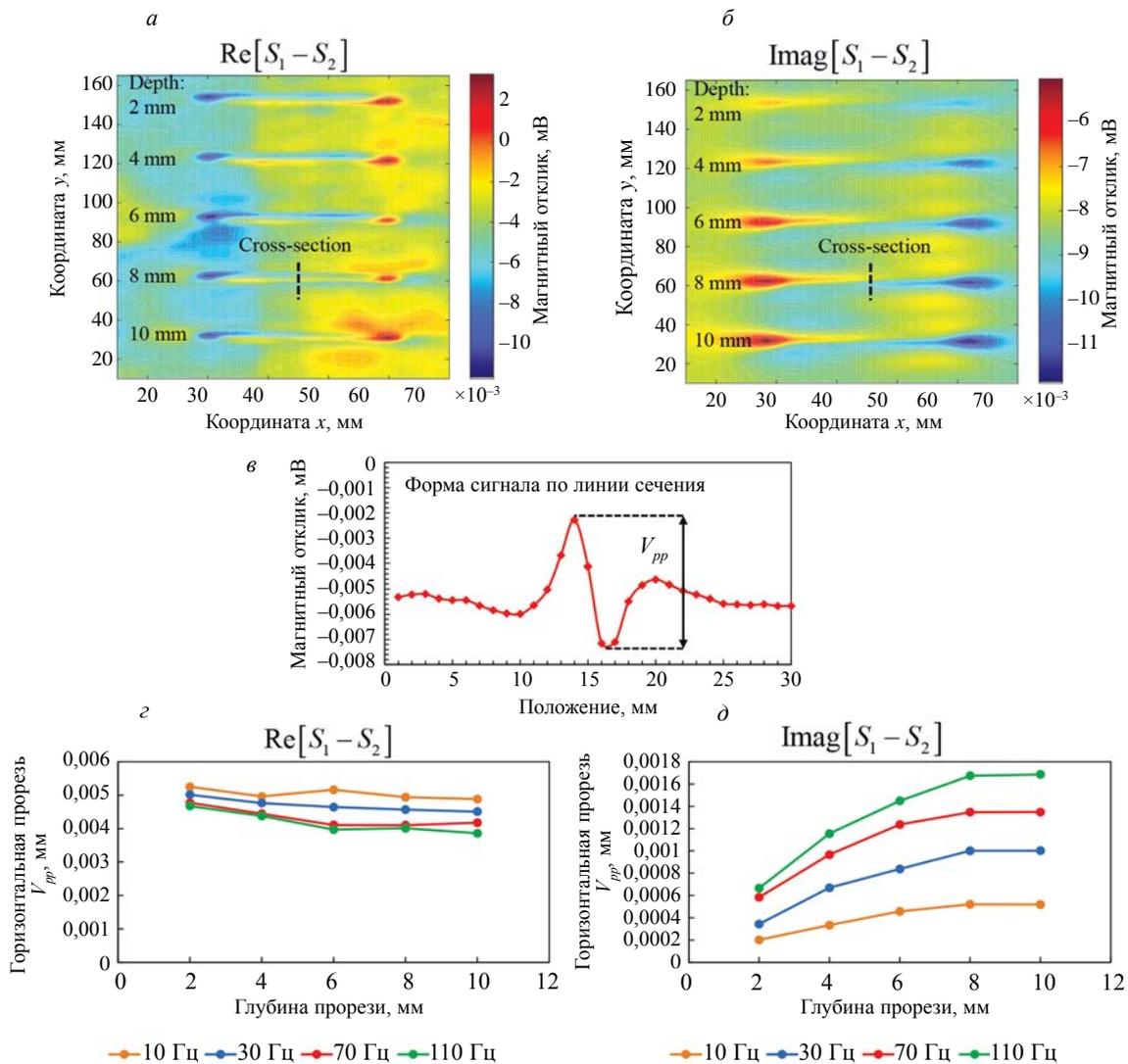


Рис. 6. Действительная (а) и мнимая (б) компоненты двумерной карты распределения, полученных при контроле горизонтальных прорезей с различными глубинами, форма сигнала по линии сечения (в), размах сигнала действительной (г) и мнимой компоненты (д) вдоль линии сечения в зависимости от глубины трещины.

сравнению с картой $Re[S_1 - S_2]$, карта $Imag[S_1 - S_2]$ лучше отображает вертикальные прорези, где изменение интенсивности сигнала в областях без дефектов было небольшим. Кроме того, влияние соседних прорезей на магнитные отклики можно считать незначительным, поскольку изменение сигнала в области между прорезями было относительно небольшим. Сигналы $S_1 - S_2$ на линиях сечения, показанных на рис. 6а, были получены для оценки пикового сигнала V_{pp} (рис. 6в) в зависимости от глубины. Линии сечения располагались вертикально по центру прорези в положении $x = 45$ мм. Сигналы V_{pp} в зависимости от глубины прорези на разных частотах показаны на рис. 6г и д для действительной и мнимой составляющих. Наблюдается корреляция между V_{pp} и глубиной щели, когда V_{pp} для $Re[S_1 - S_2]$ уменьшается по мере увеличения глубины щели. Эта тенденция была обратной в случае V_{pp} для $Imag[S_1 - S_2]$, показывая тенденцию к росту при увеличении глубины щели. Эти характеристики можно интерпретировать следующим образом: $Re[S_1 - S_2]$ связана с намагниченностью и сигналом рассеяния потока образца, при этом можно предположить, что увеличение глубины прорези уменьшало сигнал намагниченности из-за меньшего намагниченного объема. По сравнению с сигналами от рассеивания потока, сигнал намагниченности под круговой катушкой возбуждения был бы больше, так как направление намагниченности было параллельно

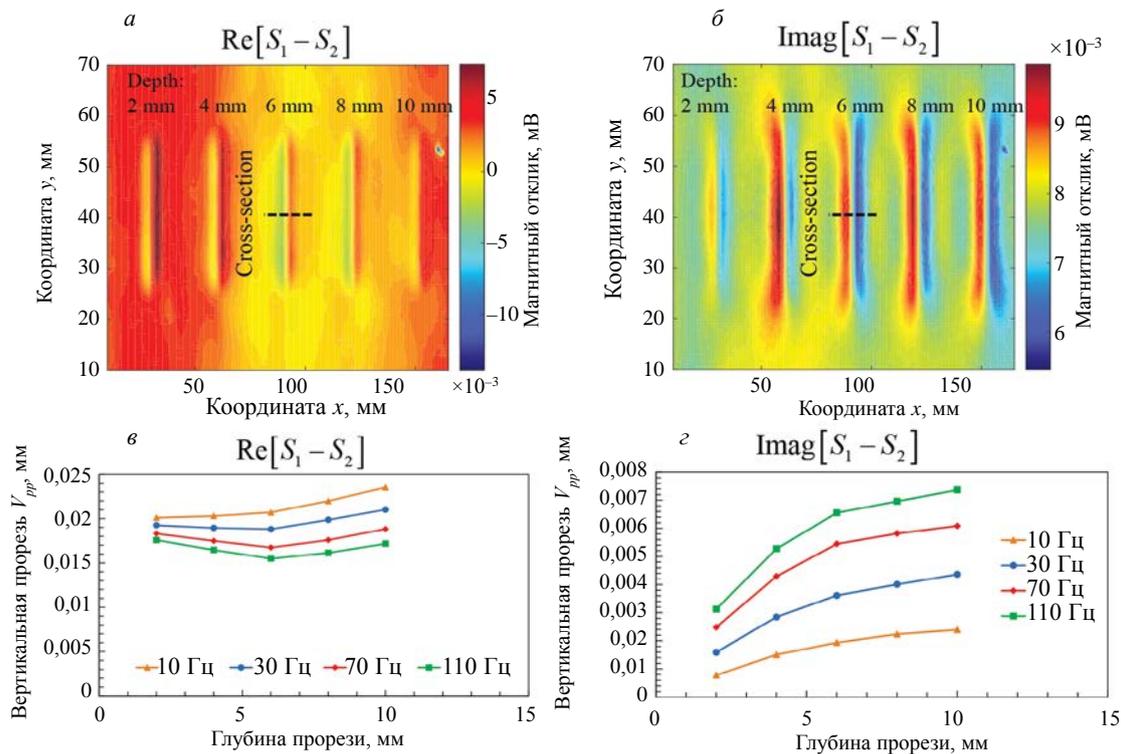


Рис. 7. Действительная (а) и мнимая (б) компоненты двумерной карты распределения, полученных при контроле горизонтальных прорезей с различными глубинами, размах сигнала действительной (в) и мнимой (г) компоненты вдоль линии сечения в зависимости от глубины трещины.

чувствительной оси S_1-S_2 . Из корреляций, полученных в отношении различных глубин щели, можно сделать вывод, что $\text{Imag}[S_1-S_2]$ будет полезна для оценки глубины щели.

На рис. 7а, б показаны карты распределения $\text{Re}[S_1-S_2]$ и $\text{Imag}[S_1-S_2]$ по поверхности образца 1, ориентированного так, чтобы получилась серия вертикальных прорезей. Параметры измерения, такие как частота возбуждения, амплитуда тока и зазор, были аналогичны предыдущему измерению. Как и на рис. 6, наличие вертикальных прорезей можно было определить по профилю изменения интенсивности сигнала. Однако, по сравнению со случаем горизонтальных прорезей, карты $\text{Re}[S_1-S_2]$ и $\text{Imag}[S_1-S_2]$ показывали заметно больший отклик сигнала в областях прорезей и представляли существование вертикальных прорезей с лучшим разрешением. Такого результата можно было ожидать, поскольку дифференциальный сигнал $[S_1-S_2]$ был задан как dB_z/dx ; следовательно, вертикальные прорезы могут привести к сильному изменению вихревых токов в направлении оси y в месте положения прорези. Значения V_{pp} сигналов S_1-S_2 в зависимости от глубин трещины были рассчитаны вдоль линий сечения, располагающихся на $y = 40$ мм и показаны на рис. 7 в, г. Была обнаружена лучшая корреляция сигнала V_{pp} для $\text{Imag}[S_1-S_2]$ в зависимости от глубины прорези по сравнению с $\text{Re}[S_1-S_2]$. Хотя подобная зависимость наблюдалась в случае вертикальных и горизонтальных прорезей, V_{pp} сигнала $\text{Imag}[S_1-S_2]$ из-за вертикальных прорезей был почти в 4 раза больше, чем в случае горизонтальных прорезей, что показывает зависимость чувствительности распознавания прорезей от дифференциальной конфигурации и ориентации прорезей.

Двухмерные карты $\text{Re}[S_1-S_2]$ и $\text{Imag}[S_1-S_2]$ для образца 2 (прорези сложной формы) показаны на рис. 8. Параметры измерения, такие как частота возбуждения, амплитуда тока и зазор, были такими же, как и в предшествующих экспериментах. Как и в случае образца 1, изменения интенсивности сигнала из-за прорезей на карте $\text{Imag}[S_1-S_2]$ были более заметны, чем на карте $\text{Re}[S_1-S_2]$. Изменения интенсивности, вызванные прорезями, ориентированными почти вертикально, т.е. прорезями 3 и 6, были больше, чем прорезями, ориентированными горизонтально. Дальнейшая оценка эффективности контроля прорезей проводилась для карт $\text{Re}[S_1-S_2]$ и $\text{Imag}[S_1-S_2]$, когда значения $V_{pp, \text{ прорезь}}$ рассчитывались по линии сечения по середине каждой прорези. Затем значения $V_{pp, \text{ прорезь}}$ сравнивались с $V_{pp, \text{ фон}}$ полученными по максимальным и минимальным значениям по площади, выделенной штриховой линией на рис. 8. Рассчитанные

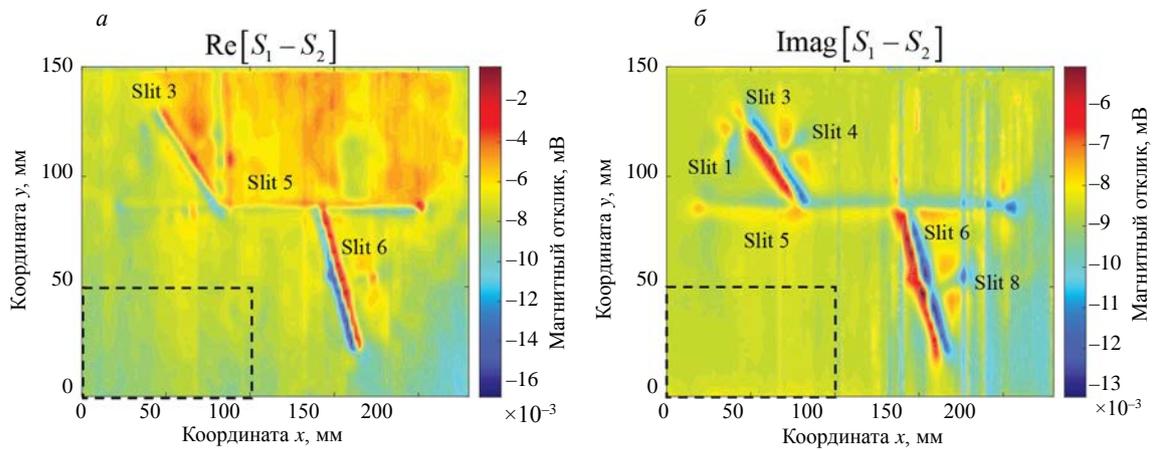


Рис. 8. Действительная (а) и мнимая (б) компоненты двумерной карты, полученной для образца 2 с различными размерами, глубинами и ориентациями прорезей.

$V_{pp, \text{ прорезь}}$ и $V_{pp, \text{ фон}}$ сведены в табл. 2. Используя критерий контроля прорезей, основанный на соотношении сигнал/шум $S/R = V_{pp, \text{ прорезь}} / V_{pp, \text{ фон}} > 2$, можно сделать вывод, что $\text{Imag}[S_1 - S_2]$ обладает лучшей способностью к распознаванию прорезей в образце 2 в сравнении с $\text{Re}[S_1 - S_2]$. Однако при использовании обоих компонент не удалось разрешить прорези 2 и 7, и это может быть связано с малой шириной в 0,5 мм прорези 2 и короткой в 5 мм прорези 7.

Нечеткое изменение интенсивности сигнала некоторых прорезей можно объяснить: 1) дифференциальной конфигурацией в x -направлении и 2) влиянием сильного возбуждающего поля, действующего на датчики. Первая причина может быть решена путем установки разностного направления в направлении оси y , чтобы можно было разрешить горизонтальные щели. Однако, несмотря на то, что датчик настроен на работу в дифференциальном режиме, вторая проблема напрямую влияет на чувствительность датчика. В разработанном датчике можно сказать, что плоскостная дифференциальная конфигурация испытывает зависимость от направления вихревого тока, где dB_z/dx будет соответствовать только вихревому току, направленному по оси y . Эта зависимость от направления вихревого тока снижает чувствительность зонда для выявления прорези, параллельной дифференциальному направлению [10]. Для преодоления этой проблемы в будущем конфигурация вихретокового датчика может быть дополнительно оптимизирована, чтобы обеспечить полное обнаружение векторов вихревых токов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследуется магнитный отклик, обусловленный наличием прорезей в стальных пластинах, с использованием круговой катушки возбуждения и планарной дифференциальной конфигурации магнитометра. Моделирование магнитного отклика показало, что метод индукции вихревого тока имеет преимущество в обнаружении щелей в любой ориентации. С помощью изготовленного кругового вихретокового датчика с планарным дифференциальным магнитометром были измерены действительные и мнимые компоненты магнитного отклика двух образцов с различной глубиной, длиной и ориентацией прорезей. Было обнаружено, что мнимая составляющая дифференциального магнитного отклика коррелирует с глубиной щели и имеет лучшую чувствительность к обнаружению, представленную измеренным значением V_{pp} для вертикальных щелей. Распознавание разнонаправленных прорезей в образце 2 показало эффективность изготовленного датчика, где было трудно разрешить почти горизонтальные прорези длиной и шириной менее 5 и 0,5 мм соответственно. Тем не менее, ориентацию более крупных щелей можно было четко определить по картам магнитного отклика. В ближайшем будущем можно будет использовать конфигурации датчиков dB_z/dx и dB_z/dy для обеспечения аналогичной чувствительности и одновременного обнаружения вертикальных и горизонтальных прорезей, в то время как общая конструкция зонда может быть улучшена для обнаружения более узких и коротких прорезей.

Работа поддержана Министерством высшего образования Малайзии (№ гранта FRGS/1/2022/TK07/UMP/02/9) и Центром управления исследованиями Университета Малайзии в Паханге (№ гранта RDU223315).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E.* Non-destructive techniques based on eddy current testing // *Sensors*. 2011. V. 11. No. 3. P. 2525—2565. DOI: 10.3390/s110302525
2. *Tsukada K., Hayashi M., Nakamura Y., Sakai K., Kiwa T.* Small Eddy Current Testing Sensor Probe Using a Tunneling Magnetoresistance Sensor to Detect Cracks in Steel Structures // *IEEE Trans. Magn.* 2018. V. 54. No. 11. P. 1—5. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2845864
3. *Xu P., Shida K.* Eddy Current Testing Probe Composed of Double Uneven Step Distributing Planar Coils for Crack Detection // *IEEE Trans. Sensors Micromachines*. 2008. V. 128. No. 1. P. 18—23. DOI: 10.1541/ieejsmas.128.18
4. *Kiselev E.K., Gol'dshtein A.E.* Eddy-Current System for Testing Inner Diameter of Pipes // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2019. V. 55. No. 3. P. 210—216. DOI: 10.1134/S1061830919030069
5. *Nadzri N.A.* Development of Eddy Current Testing System for Welding Inspection // 2018 9th IEEE Control Syst. Grad. Res. Colloq. 2018. P. 94—98. DOI: 10.1109/ICSGRC.2018.8657511
6. *Jiang Feng, Liu S., Xin S.* Influences of Excitation Current Frequency and Amplitude on Corrosion Evaluation Based on Analytical Model for Surface Magnetic Field // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2020. V. 56. No. 8. P. 668—680. DOI: 10.1134/S1061830920080057
7. *Mardaninejad R., Safizadeh M.S.* Gas Pipeline Corrosion Mapping Through Coating Using Pulsed Eddy Current Technique // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2019. V. 55. No. 11. P. 858—867. DOI: 10.1134/S1061830919110068
8. *Sasayama T., Ishida T., Matsuo M., Enpuku K.* Thickness Measurement of an Iron Plate Using Low-Frequency Eddy Current Testing With an HTS Coil // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Aug. 2016. V. 26. No. 5. P. 1—5. DOI: 10.1109/TASC.2016.2535366
9. *Repelianto A.S., Kasai N.* The improvement of flaw detection by the configuration of uniform eddy current probes // *Sensors (Switzerland)*. 2019. V. 19. No. 2. DOI: 10.3390/s19020397
10. *Saari M.M., Nadzri N.A., Zaini M.A.H.P., Ramlan N.H., Tsukada K.* A Low-frequency Eddy Current Probe Based on Miniature Fluxgate Array for Defect Evaluation in Steel Components // *IEEE Trans. Magn.* 2021. P. 1—5. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3076441
11. *Zaini M.A.H.P., Saari M.M., Nadzri N.A.I., Aziz Z., Ramlan N.H., Tsukada K.* Extraction of Flux Leakage and Eddy Current Signals Induced by Submillimeter Backside Slits on Carbon Steel Plate Using a Low-Field AMR Differential Magnetic Probe // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 146755—146770. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3123421
12. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Detecting Extended Complex-Shaped Defects in Electroconductive Plates Using a Magnetic Carrier // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2019. V. 55. No. 3. P. 217—224. DOI: 10.1134/S1061830919030094
13. *Saari M.M. et al.* Design of eddy current testing probe for surface defect evaluation // *Int. J. Automot. Mech. Eng.* 2019. V. 16. No. 1. DOI: 10.15282/ijame.16.1.2019.19.0481
14. *Yoshimura W., Sasayama T., Enpuku K.* Optimal Frequency of Low-Frequency Eddy-Current Testing for Detecting Defects on the Backside of Thick Steel Plates // *IEEE Trans. Magn.* 2019. V. PP. P. 1—5. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2896590
15. *Vyhnanek J., Ripka P.* Experimental Comparison of the Low-Frequency Noise of Small-Size Magnetic Sensors // *IEEE Trans. Magn.* 2017. V. 53. No. 4. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2633398
16. *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
17. *Postolache O., Ramos H.G., Ribeiro A.L.* Computer Standards & Interfaces Detection and characterization of defects using GMR probes and artificial neural networks // *Comput. Stand. Interfaces*. 2011. V. 33. No. 2. P. 191—200. DOI: 10.1016/j.csi.2010.06.011
18. *Carr C., Graham D., Macfarlane J.C., Donaldson G.B.* HTS SQUIDS for the nondestructive evaluation of composite structures. V. 1387.
19. *Hatsukade Y., Tanaka S.* Mobile NDE System Utilizing Robust HTS-SQUID Magnetometer for Use in Unshielded Environments // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016. V. 26. No. 3. DOI: 10.1109/TASC.2015.2512845
20. *Xu Z., Wang X., Deng Y.* Rotating focused field eddy-current sensing for arbitrary orientation defects detection in carbon steel // *Sensors (Switzerland)*. 2020. V. 20. No. 8. DOI: 10.3390/s20082345
21. *Chang. Y., Jiao J., Li G., Liu X., He C., Wu B.* Effects of excitation system on the performance of magnetic-flux-leakage-type non-destructive testing // *Sensors Actuators A Phys.* Dec. 2017. V. 268. P. 201—212. DOI: 10.1016/j.sna.2017.08.009

ПОВЫШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СТАЛЕЙ

© 2023 г. С.Г. Сандомирский^{1,*}

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Беларусь 220012 Минск, Академическая, 12
E-mail: *sand_work@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023; после доработки 10.06.2023

Принята к публикации 20.06.2023

Статистическим анализом результатов измерения остаточной намагниченности M_r и намагниченности M_s технического насыщения конструкционных сталей показано, что отношение $K_S = M_r/M_s$ в гораздо меньшей степени, чем M_r , чувствительно к изменениям фазового состава сталей. С учетом и более точного измерения K_S , чем M_r , предложено использовать параметр K_S для магнитной структуроскопии среднеуглеродистых сталей в практически важном диапазоне изменения температуры отпуска взамен M_r и коэрцитивной силы H_c . Показано, что магнитный параметр $\xi = H_c/M_s$, при термических обработках, изменяющих фазовый состав и структуру сталей, в ряде случаев обладает меньшей, чем параметр H_c , чувствительностью к фазовому составу стали. Для повышения достоверности интерполяции аналитической функцией экспериментальной зависимости между магнитным параметром и твердостью стали предложено использовать логическую функцию «если» — разные функциональные зависимости между магнитным параметром и твердостью стали в зависимости от измеренной величины магнитного параметра.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, магнитный структурный анализ, магнитные параметры сталей, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность технического насыщения.

DOI: 10.31857/S0130308223080079, EDN: DZFOFH

Параметрами предельной петли магнитного гистерезиса сталей, чувствительными к их структуре (плотности дислокаций, величине зерна, наличию и размерам включений, напряжениям и т.д.), являются коэрцитивная сила H_c и остаточная намагниченность M_r [1]. К фазовому составу стали чувствительна намагниченность M_s технического насыщения [2]. Это явилось основой магнитного структурного анализа — определения структуры, фазового состава и физико-механических свойств материалов изделий по их магнитным параметрам [3]. Одной из причин, снижающих эффективность использования H_c и M_r сталей в магнитном структурном анализе является наблюдающаяся на практике их зависимость не только от структуры, но и от фазового состава сталей — намагниченности M_s технического насыщения.

В [4] показано, что все изменения магнитных проницаемостей, релаксационных и других магнитных параметров сталей, связанные с изменениями их структурного состояния и фазового состава, обусловлены только происходящими при этом изменениями H_c , M_r и M_s этих сталей. Для повышения достоверности магнитной структуроскопии предложено формировать ее информационные параметры из результатов измерения H_c , M_r и M_s сталей.

В [5] статистическим анализом результатов измерения M_r и M_s конструкционных сталей обоснован подход к формированию из их M_r и M_s информационного параметра $K_S = M_r/M_s$, который может быть измерен точнее, чем M_r . Обоснована более высокая, чем у параметра M_r , чувствительность K_S к изменениям структуры сталей при их термических обработках.

В обоснование того, что и магнитный параметр $\xi = H_c/M_s$ при термических обработках, изменяющих фазовый состав и структуру многих сталей, обладает меньшей, чем параметр H_c , чувствительностью к фазовому составу стали, воспользовались результатами [6] выполненных по стандартным методикам измерений H_c и M_s сталей 45 и 40X после отпуска в интервале температур 300—600 °С, приведенными в табл. 1. Их статистический анализ показал, что коэффициент корреляции R между H_c и фазочувствительным параметром M_s исследованных сталей равен 0,5316 для стали 45 и 0,6100 для стали 40X, а R между ξ и M_s этих сталей равен 0,4803 и 0,5781 соответственно. Это показывает меньшую, по сравнению с параметром H_c , чувствительность параметра ξ к изменениям фазового состава сталей. Таким образом, параметр ξ больше, чем параметр H_c , чувствителен к изменениям структуры сталей.

Для повышения точности интерполяции зависимости между магнитным параметром и твердостью стали в разрабатываемой зависимости применим [7] логическую функцию «если» — используем разные функции связи между твердостью стали и магнитным параметром в зависимости от измеренной его величины. Эффективность этого подхода покажем построением зависимости

Таблица 1

Магнитные параметры H_c и M_s сталей 45 и 40X, отпущенных при разных температурах T_0 после закалки в масло от 860 °С

$T_0, ^\circ\text{C}$	Сталь 45			Сталь 40X		
	$H_c, \text{A/м}$	$M_s, \text{кA/м}$	$10^6 H_c/M_s$	$H_c, \text{A/м}$	$M_s, \text{кA/м}$	$10^6 H_c/M_s$
300	1340	1631	822	1490	1642	822
350	1260	1631	773	1440	1651	773
400	1120	1627	688	1320	1650	688
450	1020	1626	627	1220	1648	627
500	1030	1625	634	1150	1643	634
550	1050	1617	649	1200	1638	649
600	1040	1606	648	1160	1630	648

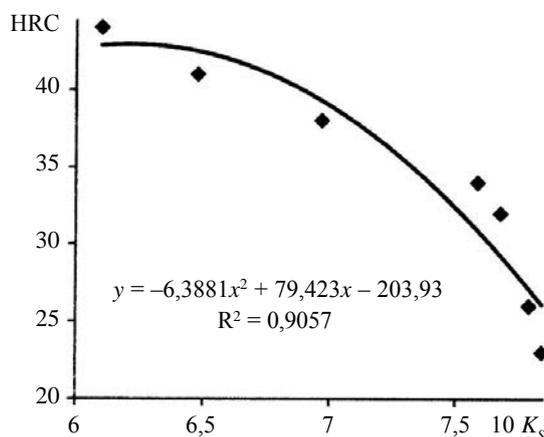


Рис. 1. Корреляционное поле зависимости между K_S и HRC стали 30, его линия тренда с уравнением и достоверностью R^2 аппроксимации.

HRC(K_S) стали 30. Корреляционное поле зависимости между K_S и HRC для практически важного диапазона изменения T_0 стали 30 по данным [6] приведено на рис. 1.

Разобьем корреляционное поле зависимости между K_S и HRC стали 30 на два перекрывающихся диапазона изменения K_S :

$$\text{если } K_S \leq 0,756, \text{ то } \text{HRC} = 84,202 - 66,252 K_S; \quad (1)$$

$$\text{если } K_S > 0,756, \text{ то } \text{HRC} = 18424 K_S - 12232 K_S^2 - 6903,3. \quad (2)$$

Корреляционное поле между результатами расчета и измерения HRC по разработанным формулам (1) и (2) приведено на рис. 2.

Представленная на рис. 2 зависимость и результаты ее статистической обработки (среднее квадратичное отклонение между твердостью HRC стали 30 и результатами ее расчета по формулам (1) и (2) по данным рис. 2 составило 0,67 %) показали, что предложенная методика изменения используемой функциональной зависимости в соответствии с измененным значением магнитного параметра потенциально позволяет на порядок повысить достоверность функциональной зависимости твердости HRC стали 30 от ее магнитного параметра. Она легко может быть реализована в магнитных структуроскопах программным путем после преобразования результата измерения магнитного параметра в цифровую форму.

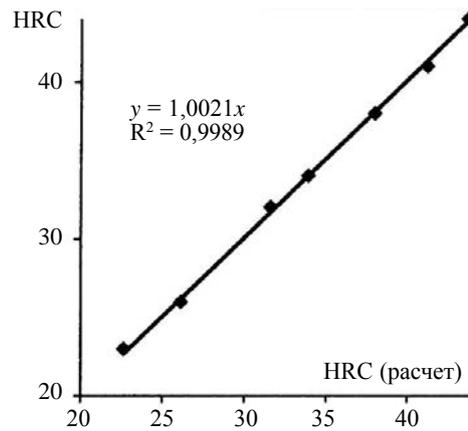


Рис. 2. Корреляционное поле зависимости между HRC стали 30 и результатами ее расчета с линией тренда, ее уравнением и достоверностью R^2 аппроксимации.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют рекомендовать при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии сосредоточить внимание на повышении точности измерения отношений $K_s = M_r/M_s$ и $\xi = H_c/M_s$ материала изделий и использовать результаты измерения этих параметров взамен параметров M_r и H_c .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вонсовский С.В., Михеев М.Н.* Магнитный структурный анализ // Заводская лаборатория. 1957. № 10. С. 122—1226.
2. *Апаев Б.А.* Фазовый магнитный анализ сплавов. М.: Металлургия, 1973. 280 с.
3. Неразрушающий контроль. Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн.1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
4. *Клюев В.В., Сандомирский С.Г.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
5. *Sandomirski S.G., Kostin V.N., Vasilenko O.N.* и др. About the Possibilities of Construction and Application of the Generalized Magnetic Parameters of Steel Hardometry after Hardening and Release // The VII International Young Researchers' Conference — Physics, Technology, Innovations (PTI-2020) AIP Conf. Proc. 2313, 030030-1–030030-6. <https://doi.org/10.1063/5.0032978>
6. *Буда Г.В., Ничипурук А.П.* Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
7. *Сандомирский С.Г.* Использование логической функции в алгоритме связи между магнитным параметром и твердостью стали / Приборостроение — 2022: материалы 15-й международной научно-технической конференции, Минск, 16—18 ноября 2022. Мн.: БНТУ. ISBN 978-985-583-862-4. С. 322—323.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2023 г. К.В. Гоголинский^{1,*}, А.С. Уманский^{1,**}, А.С. Голев^{1,***}

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Россия 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2

E-mail: *gogolinskiy_kv@pers.spmi.ru; **umanskiy_as@pers.spmi.ru;

***artemgolev1999@gmail.com

Поступила в редакцию 31.05.2023; после доработки 14.06.2023

Принята к публикации 16.06.2023

Исследования проведены в рамках разработки неразрушающего метода измерения механических свойств металлов и сплавов на основе метода динамического инструментального индентирования. Целью данной работы является изучение возможности измерения модуля упругости с помощью модифицированного твердомера Либа. Эксперимент проводился на образцах сплавов 20X25H20C2, 20X23H18 и БрАНЖНМц9-4-4-1.

Ключевые слова: механические испытания, модуль упругости, твердость, метод Либа, метод динамического инструментального индентирования.

DOI: 10.31857/S0130308223080080, EDN: DZHG0X

ВВЕДЕНИЕ

Существующие тенденции современного производства в вопросах повышения надежности, долговечности и качества выпускаемой продукции ставят новые задачи в области контроля продукции. В промышленности предъявляются высокие требования к используемым металлам и сплавам, о качестве которых судят по их физико-механическим характеристикам. Одним из важнейших физико-механических параметров металлов и сплавов является их модуль упругости. К современным методам определения модуля упругости относятся испытания на растяжение [1], испытания методом инструментального индентирования [2] и испытания методом динамического инструментального индентирования (ДИИ) [3]. Определение модуля упругости при помощи испытаний на растяжение или по методу инструментального индентирования требует вырезки из объекта испытания испытываемого образца для проведения эксперимента в лабораторных условиях. Метод ДИИ позволяет проводить оперативные неразрушающие испытания с целью определения физико-механических параметров материала непосредственно на объекте контроля, что является актуальной задачей современной промышленности.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

На сегодняшний день нет серийного исполнения приборов и систем, реализующих метод ДИИ, а ГОСТ Р 56474—2015 «Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования» не регламентирует требования к энергетическим параметрам ударника преобразователя, поэтому в работе [4] было предложено использование модифицированных преобразователей по методу Либа [5] для реализации метода ДИИ. Результаты, полученные в работе [4], показали, что при использовании модернизированного преобразователя Либа возможно получить классические зависимости контактной нагрузки P от перемещения индентора ударника h и рассчитать рассеянную энергию удара, упругую энергию удара и контактное давление.

В данной работе исследовалась возможность определения модуля упругости методом ДИИ при помощи модифицированного преобразователя Либа. Для проведения эксперимента были подготовлены образцы сплавов стали 20X25H20C2 и 20X23H18 и бронзы БрФНЖНМц9-4-4-1. В целях обеспечения соответствия испытываемых образцов требованиям для испытаний твердомером Либа по ГОСТ Р 8.969—2019 (ИСО 16859-1:2015) «Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений» были выполнены операции точения, шлифовки и притирки их к более массивным основаниям.

При проведении испытаний сигнал с измерительной катушки индуктивности записывался при помощи осциллографа, сохранялся на флеш-накопитель и обрабатывался на персональном компьютере в программной среде MatLab.

Методика построения зависимостей контактной нагрузки от перемещения ударника $P(h)$ описана в [4]. Полученный массив данных сигнала переменной ЭДС $e(t)$ пересчитывался в значение скорости $v(t)$ при помощи коэффициента пропорциональности k . Зависимость ускорения ударника $a(t)$ от времени определяется путем численного дифференцирования $v(t)$ по времени. Контактная нагрузка ударного взаимодействия $P(t)$ была получена путем умножения ускорения на известное значение массы ударника $m = 5,44$ г. Интеграл $v(t)$ дает перемещение ударника $h(t)$. Из зависимостей $P(h)$ по ГОСТ Р 8.748—2011 (ИСО 14577-1:2002) «Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний» были получены следующие данные: приведенный модуль упругости E_r и модуль упругости при индентировании E_{IT} . Максимальная испытательная нагрузка F_{max} , максимальная глубина индентирования h_{max} , остаточная глубина отпечатка после снятия испытательной нагрузки h_p , глубина h_r , определяемая точкой пересечения касательной к кривой разгрузки при F_{max} с осью перемещения h . По этим были данным рассчитаны глубина погружения наконечника в испытательный образец при F_{max} h_c , площадь поперечного сечения наконечника на расстоянии h_c от вершины $A_p(h_c)$, податливость в месте контакта C , приведенный модуль упругости E_r и модуль упругости при индентировании E_{IT} . При расчете h_c брался коэффициент ϵ , равный 0,75, так как ударник имеет сферический индентор с радиусом 1,5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На описанных выше образцах было проведено по 10 испытаний, рассчитаны среднее значение и СКО. Результаты эксперимента, справочные значения модуля Юнга исследуемых сплавов и их сравнение представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний

Номер испытания	Модуль упругости при индентировании E_{IT} , ГПа		
	20X25H20C2	20X23H18	БрАНЖНМц9-4-4-1
Параметр	Значение		
Среднее значение, ГПа	153	136	84
СКО, ГПа	7	6	6
Справочное значение модуля упругости, ГПа	204	204	106
Абсолютная погрешность, ГПа	51	68	22
Относительная погрешность, %	25	33	21

ВЫВОДЫ

Значения рассчитанного модуля упругости при индентировании E_{IT} ниже на 25 % для образца стали 20X25H20C2, на 33 % для образца стали 20X23H18 и на 21 % для образца бронзы БрАНЖНМц9-4-4-1. Полученные результаты демонстрируют корреляцию измеряемых значений со справочными данными, однако наблюдается существенное систематическое отклонение. Причиной этого могут быть как погрешности при измерении первичных параметров $P(t)$ и $h(t)$, так и применение методики анализа зависимостей $P(h)$, принятой для статического инструментального индентирования. Решить эти проблемы можно за счет повышения точности измерения первичных параметров путем анализа фактических размеров получаемых отпечатков, а также разработки методики анализа зависимостей $P(h)$ с учетом динамического характера взаимодействия. Результатом исследований можно считать подтверждение перспективности применения метода ДИИ для неразрушающего контроля механических свойств материалов, однако для повышения точности метода требуются дополнительные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rodrigues Santiago, Miri Seyed, Cole Richard G., Postigo Abraham Avalos, Saleh Menna A., Dondish Alexander, Melenka Garrett W., Fayazbakhsh Kazem.* Towards optimization of polymer filament tensile test for material extrusion additive manufacturing process // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.088>
2. *Han Giyeol, Marimuthu Karuppasamy Pandian, Lee Hyungyil.* Evaluation of thin film material properties using a deep nanoindentation and ANN // *Materials & Design*. 2022. V. 221. P. 111000. ISSN 0264-1275. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111000>
3. *Rudnitskii V.A., Rabtsevich A.V.* Method of dynamic indentation for evaluating the mechanical characteristics of metallic materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 1997. V. 33. No. 4. P. 266—271.
4. *Umanskii A., Gogolinskii K., Syasko V., Golev A.* Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // *Inventions*. 2022. V. 7. P. 29. <https://doi.org/10.3390/inventions7010029>
5. *Leeb D.* New dynamic method for hardness testing of metallic materials // *VDI-Report*. 1978. No. 308. P. 123—128.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ТРУБ И ЛИСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SH- И tH-ВОЛН

© 2023 г. Л.В. Волкова^{1,*}, О.В. Муравьева¹, К.В. Колпаков¹

¹ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова,
Россия 426064 Ижевск, ул. Студенческая, 7
E-mail: *ludmila396@rambler.ru

Поступила в редакцию 31.05.2023; после доработки 09.06.2023
Принята к публикации 09.06.2023

Приведены результаты сравнительных исследований акустической анизотропии tH-волн и SH-волн в листах и трубах различной толщины. Поворот направления поляризации за счет соответствующей ориентации преобразователей позволил оценить угловую индикатрису скорости волн относительно направления проката. Показаны существенные различия в акустической анизотропии tH-волн и SH-волн как для труб, так и для листов.

Ключевые слова: листы, трубы, акустическая анизотропия, индикатриса скорости, tH-волна, SH-волна, скорость волны.

DOI: 10.31857/S0130308223080092, EDN: DZHS AJ

ВВЕДЕНИЕ

Для листового проката из углеродистых сталей характерна анизотропия механических свойств, которая влияет на свойства материала при производстве изделий, технологические и эксплуатационные характеристики. Акустические методы структуроскопии по скорости ультразвуковых волн широко применяются при оценке напряженно-деформированного состояния, прочностных свойств, текстуры и анизотропии проката [1—3]. ГОСТ Р 52890—2007 регламентирует использование при оценке акустической анизотропии поперечных горизонтально поляризованных tH-волн, при этом на фактор анизотропии накладывается фактор напряженно-деформированного состояния объекта, в том числе при формировании труб из листа. Использование нормальных волн горизонтальной поляризации (SH-волна) эффективно при контроле листов и труб, в том числе методами внутритрубной диагностики [4]. При этом требуется знание скоростей акустических волн в различных направлениях.

Цель работы: сравнительные исследования акустической анизотропии tH-волн и SH-волн в листах и трубах различной толщины.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований использованы листы из стали Ст3 и 09Г2С толщиной 8, 12 и 16 мм размерами 1000×1000 мм² и изготовленные из указанного проката методом холодного гнба вырезки труб диаметром 500 мм шириной 1000 мм с продольным сварным швом. Для исследований акустической анизотропии tH-волны использован электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь и структуроскоп СЭМА. ЭМА-преобразователь формирует две tH-волны ортогональных поляризаций в плоскости листа (трубы), распространяющиеся по толщине листа (рис. 1а). Вращение ЭМА-преобразователя относительно центра излучателя по угловому шаблону с шагом 10° позволяет оценить изменение скорости по углу и построить индикатрису скорости tH-волны. Скорость tH-волны C_{tH} рассчитывалась по разнице времен прихода между N донными импульсами

$$\Delta t_N: C_{tH} = \frac{h \cdot N \cdot 2}{\Delta t_N}, \text{ где } h \text{ — толщина листа (трубы).}$$

При исследовании скорости SH-волны использовали пьезопреобразователи с сухим точечным контактом в раздельном режиме, разнесенные на расстояние $l = 400$ мм и низкочастотный дефектоскоп DIO 1000 LF (рис. 1б). Перемещение пьезоизлучателя и пьезопремника по угловому шаблону с шагом 10° (рис. 1в) позволяет построить индикатрису скорости SH-волны. Скорость SH-волны C_{SH} рассчитывалась по времени прихода импульса t от излучателя к приемнику с учетом времени

задержки в преобразователе и точки отсчета времени t_3 : $C_{SH} = \frac{l}{t_{\text{общ}} - t_3}$. С целью увеличения точ-

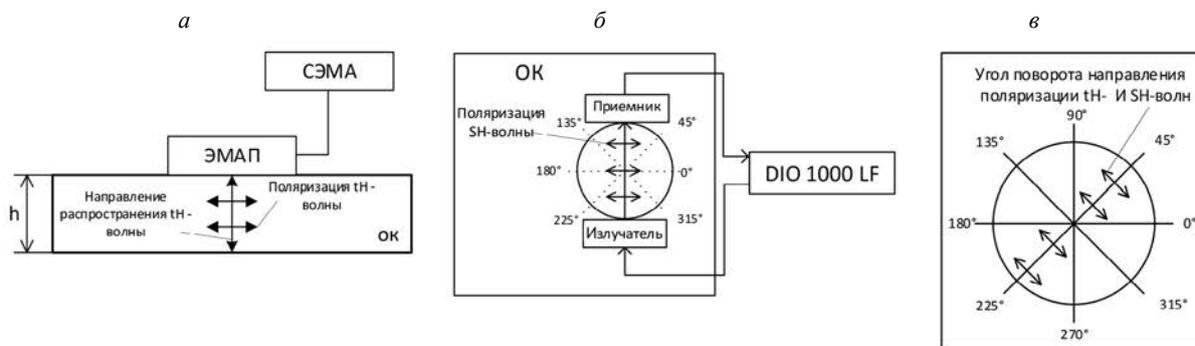


Рис. 1. Схема измерения акустической анизотропии tH-волны (а), SH-волны (б), изменение направления поляризации волн (в).

ности, время прихода в зависимости от угла определено с использованием функции автокорреляции импульсов. Погрешность измерения скоростей составила 1 м/с.

Коэффициент анизотропии a_0 определяется формулой: $a_0 = \frac{2 \cdot (C_0 - C_{90})}{C_0 + C_{90}} \cdot 100\%$, где C_0 , C_{90} — скорости распространения SH-волн или tH-волн с поляризацией под углом 0 и 90 град относительно направления проката.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований индикатрисы скорости акустической волны в листе и трубе одной толщины (12 мм) иллюстрирует рис. 2. Значения акустической анизотропии

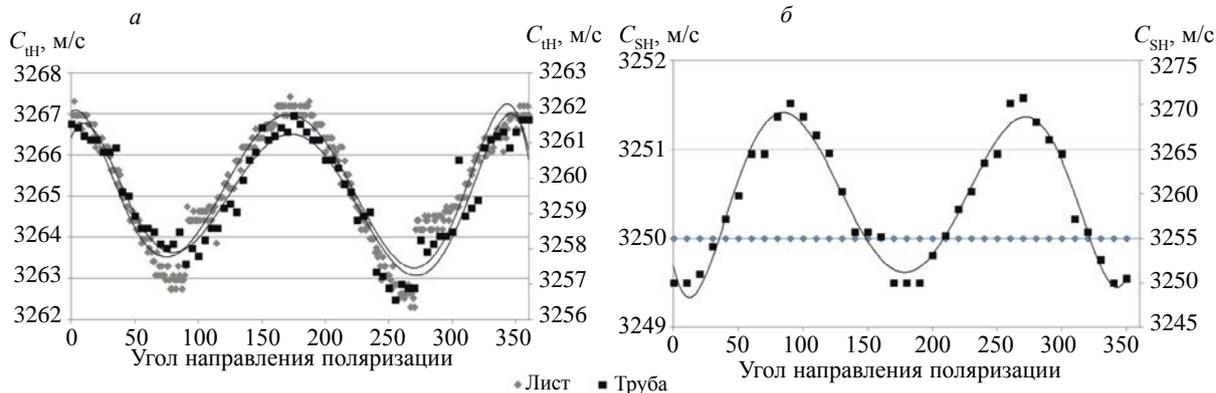


Рис. 2. Индикатрисы скоростей tH-волн (а) и SH-волн (б) в листе и трубе толщиной 12 мм.

Таблица 1

Акустическая анизотропия исследованных образцов

Тип волны	Коэффициент анизотропии, %					
	Лист			Труба		
	8 мм	12 мм	16 мм	8 мм	12 мм	16 мм
tH-волна	1,5	0,2	1,4	1,3	0,1	1,2
SH-волна	0	0	0,4	5,5	2,4	3,1

исследованных образцов представлены в табл. 1. Имеются существенные различия в характере изменения скорости и значениях анизотропии свойств SH-волн и tH-волн в листах и трубах.

В общем случае tH-волна, распространяющаяся в направлении толщины листа и в направлении толщины трубы, имеют близкую анизотропию, при этом наблюдается незначительное уменьшение анизотропии при переходе от листа к трубе. В отличие от tH-волны, анизотропия для SH-волны, распространяющейся вдоль листа (трубы) при той же поляризации, имеет существенно меньшую (нулевую) анизотропию в случае листа, при этом распространение SH-волн в трубе приводит к существенному увеличению анизотропии до 5,5 % для трубы толщиной стенки 8 мм. В общем случае акустическая анизотропия SH-волн в трубе превышает анизотропию по tH-волне, что может быть обусловлено дополнительным влиянием геометрической анизотропии, обусловленной различием в путях распространения волны с эпюрой по толщине по цилиндрической поверхности.

ВЫВОДЫ

Исследованные закономерности распространения tH-волн и SH-волн в листах и трубах могут быть использованы в задачах оценки напряженно-деформированного состояния и волноводного контроля в качестве учета влияющего фактора начальной анизотропии и геометрической дисперсии скорости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Муравьева О.В., Муравьев В.В.* Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 363—369.
2. *Belyaev A.K., Galyautdinova A.R., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A.* Acoustic anisotropy and hydrogen concentrations during thermomechanical loading of single-crystal nickel-based superalloys // *Advanced Structured Materials*. 2021. V. 143. P. 19—32.
3. *Хлыбов А.А., Углов А.Л., Рябов Д.А., Аносов М.С.* Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 4. С. 18—26.
4. *Trushkevych O., Dixon S., Tabatabaeipour M., Potter M.D.G., MacLeod C., Dobie G., Edwards R.S.* Calibration-free SH guided wave analysis for screening of wall thickness in steel with varying properties // *NDT & E International*. 2023. V. 135. P. 102789.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВА СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ LiCaAlF₆ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ АКУСТИКИ

© 2023 г. Е. Б. Желева^{1,2,*}, В. В. Семашко^{1,2,**}, А. А. Шавельев¹,
О. А. Морозов^{1,2}, В. М. Кяшкин¹, А. А. Карабутов², Ю. П. Бродниковский²

¹ФГАОУ ВО КФУ, Россия 420008 Казань, ул. Кремлевская, 18
²КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, Россия 420029 Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7
E-mail: *stillsennin@mail.ru; **ua4psy@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023; после доработки 09.06.2023
Принята к публикации 09.06.2023

Исследованы акустические свойства кристаллов LiCaAlF₆ и влияние на них процедуры отжига. Методом лазерной акустики измерены скорости продольных и сдвиговых ультразвуковых волн вдоль направления оптической оси кристаллов, определены механические константы: модули упругости, всестороннего сжатия, сдвига и коэффициент Пуассона. Установлено, коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в диапазоне частот 1—15 МГц может служить характеристикой оптического совершенства данных кристаллов. Обнаружен эффект ультразвукового отжига образцов кристаллов LiCaAlF₆ при длительном воздействии импульсного ультразвука.

Ключевые слова: лазерные кристаллы, лазерная акустика, дефектоскопия, коэффициент затухания, ультразвуковой отжиг.

DOI: 10.31857/S0130308223080109, EDN: DZSGPO

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллическая матрица LiCaAlF₆ (LiCAF) имеет наибольшую ширину запрещенной зоны (~100000 см⁻¹) среди известных материалов, что позволяет при ее активации ионами Ce³⁺ реализовать УФ перестраиваемый лазер с уникальными характеристиками [1]. Кроме того, благодаря своим спектрально-кинетическим свойствам и относительно узкой ширине фононного спектра (< 600 см⁻¹), кристаллы Cr:LiCAF успешно конкурируют с известными активными средами ближнего ИК-диапазона: Cr³⁺:BeAl₂O₄ и Ti³⁺:Al₂O₃, демонстрируя возможность перестройки частоты, высокую энергетическую эффективность лазерной генерации, пригодность для накачки излучением импульсных Хе-ламп или лазерных диодов с длиной волны ~650 нм в сочетании с удобством технической реализации и эксплуатации [2]. Однако выращивание совершенных кристаллов LiCAF достаточно трудоемко и разработка технологии их синтеза остается актуальной. Традиционно, оптическое совершенство кристаллов оценивается поляризационными и интерферометрическими методами, что, однако, требует значительных усилий и временных затрат на подготовку образцов для исследований, заключающейся в их прецизионной шлифовке и полировке. Кроме того, результаты подобных исследований зачастую носят качественный характер. Целью настоящей работы является оценка возможностей использования лазерно-акустической методики для оперативной и количественной оценки совершенства синтезируемых кристаллов LiCAF и эффективности процедуры их отжига.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кристаллы LiCAF были выращены из расплава методом Бриджмена в НИЛ МРС и КЭ им. С.А. Альтшулера КФУ. Было установлено, что по всей их длине наблюдается анизотропное рассеяние света на микроскопических дефектах неизвестной природы, которые успешно устраняются 48-часовым отжигом образцов в атмосфере CF₄ при температуре на 10—15 °С ниже температуры плавления кристалла. Отжиг также значительно улучшил оптическую однородность образцов, измеряемую с помощью интерферометра Жамена ($\Delta n \leq 1,2 \times 10^{-5}$). Рентгеноструктурный анализ с пространственным разрешением показал, что в неотожженных образцах имеет место микроблочность по всему их объему. Размер блоков достигает несколько десятков микрометров, а блоки разориентированы между собой на угол до 0,15°. Отжиг приводит к увеличению размеров блоков до долей миллиметров и уменьшению их взаимной разориентации до 0,03—0,04°.

Образцы кристаллов № 1 и № 2 до и после отжига соответственно также были исследованы методом контактной лазерно-акустической дефектоскопии с использованием дефектоскопа УДЛ-

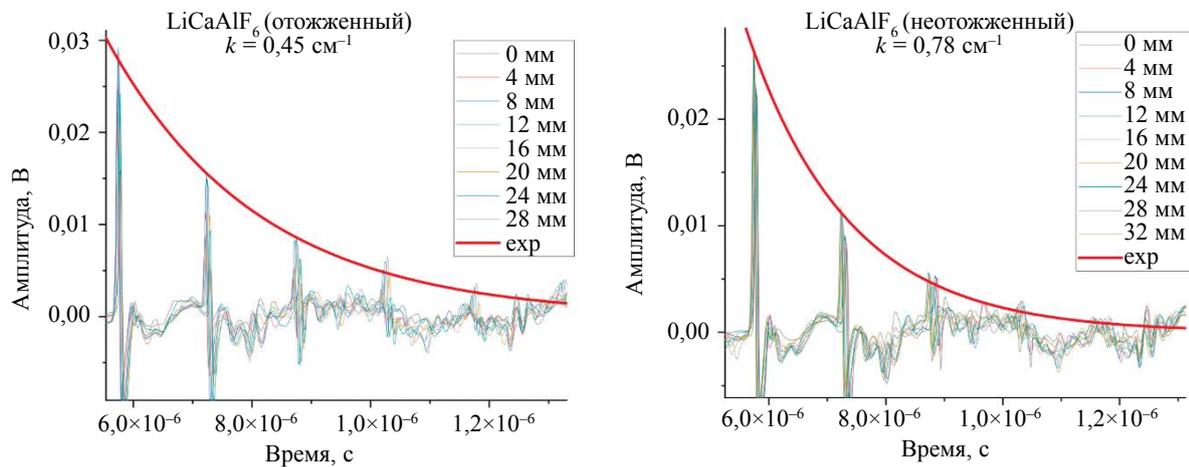
2М. Особенностью данного прибора является генерация пачки коротких импульсов ультразвука длительностью 50—70 нс с пиковым давлением 25 кПа. Частота повторения импульсов до 1 кГц. Прибор позволяет осуществлять прецизионные измерения скоростей продольных и сдвиговых ультразвуковых волн (УЗВ), локально определять механические константы образцов, исследовать частотно-зависимые характеристики затухания ультразвука. Эксперимент проводили по следующей технологии: в качестве иммерсионной жидкости, обеспечивающей акустический контакт датчика прибора УДЛ-2М, использовалась вода. Измерения осуществляли в разных точках образца, располагающихся на расстоянии 4 мм друг от друга. Скорости продольных и сдвиговых волн определяли по времени задержки донных сигналов. Затем на основании измерений скоростей звука вычисляли механические константы. Результаты измерений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические константы кристаллов LiCAF до и после отжига
(c_L и c_S — скорости продольной и сдвиговой УЗВ, E — модуль упругости, k — модуль всестороннего сжатия, G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона)

Образец	c_L , м/с	c_{S1} , м/с	E_1 , ГПа	K_1 , ГПа	G_1 , ГПа	ν_1	c_{S2} , м/с	E_2 , ГПа	K_2 , ГПа	G_2 , ГПа	ν_2
1	6146±8	1706±8	25,4±0,2	101,3±0,3	8,7±0,1	0,46	1552±8	21,1±0,2	103,3±0,4	7,2±0,1	0,47
2	6150±12	1702±14	25,3±0,4	101,5±0,3	8,7±0,1	0,46	1553±3	21,1±0,1	103,4±0,4	7,2±0,1	0,47

Коэффициент затухания в области частот УЗВ 1-15 МГц определяли путем измерения амплитуд донных сигналов и аппроксимации их уменьшения со временем экспоненциальной функцией (рис. 1). Потери энергии УЗВ на отражения от поверхностей образцов рассчитывали согласно рекомендациям работы [5]. Установлено, что коэффициент затухания в неотожженных образцах достигал $0,78 \text{ см}^{-1}$, тогда как в образцах после отжига он составил лишь $0,45 \text{ см}^{-1}$. Полученные результаты укладываются в представления о рассеяния УЗВ на границах микроблоков, что позволяют предположить, что наблюдаемое рассеяние света в неотожженных образцах обусловлено их блочной структурой, а метод лазерно-акустической дефектоскопии может с успехом применяться для локальной оценки и эффективности методов повышения совершенства структуры прозрачных и непрозрачных материалов.

Рис. 1. Зависимости затухания ультразвуковых импульсов в образцах LiCaAlF₆.

ВЫВОДЫ

Отжиг кристалла действительно улучшает оптическое качество кристалла. Ультразвуковые методы могут быть использованы для анализа совершенства кристаллической структуры данного

кристалла (рассматриваем коэффициент затухания). Обнаружено, что длительное воздействие применяемого для исследований ультразвука приводит к постепенному уменьшению коэффициента затухания УЗВ и снижению анизотропного коэффициента рассеяния лазерного излучения в исследованных образцах.

Работа проведена за счет субсидии FZSM-2023-0012, выделенной Казанскому федеральному университету на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности, исследование акустических характеристик кристаллов — в рамках государственного задания ФИЦ «Казанский научный центр РАН».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Semashko V.V.* Problems in searching for new solid-state UV-and VUV-active media: The role of photodynamic processes // *Phys. Solid State*. 2005. V. 47. P. 1507—1511.
2. *Demirbas U.* Cr: Colquiriite Lasers: Current Status and Challenges for Further Progress // *Progress in Quantum Electronics*. 2019. V. 68. Art. № 100227.
3. *Shavelev A.A., Shakirov A.A., Lukinova E.V., Aglyamov R.D., Naumov A.K., Semashko V.V., Nizamutdinov A.S., Palianov P.A., Panchenko Yu.N., Bobrovnikov S.M.* Growing LiCAF crystal with 3 at% Cr³⁺ and studying its properties // *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. 2019. V. 11322. Art. № 113221L.
4. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости / Издание 5-е, стереотипное. М.: Физматлит, 2007. 259 с. (Теоретическая физика, т. VII). ISBN 5-9221-0122-6.
5. Справочник по технической акустике. Пер. с нем. / Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. Ленинград: Изд-во Судостроение, 1980. 440 с.



Уважаемые коллеги!
Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике приглашает Вас принять участие в

XXXIII ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ УМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НК. ЕДИНСТВО ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

- Изменения и перспективы развития в области методов, технологий и методик НК
- Разработка и внедрение современных приборов и систем НК, МС и ТД для производств и сложных инфраструктурных объектов
- Передовое математическое, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение моделирования, получения и обработки информации, представления данных НК, МС и ТД
- Научные исследования новых материалов и высоких технологий как область НК
- Междисциплинарные направления современного НК
- Медицина, жизнеобеспечение и среда обитания человека как сфера НК и МС
- Подготовка и способы оценки знаний, умений и навыков специалистов НК
- Стандартизация и метрологическое обеспечение средств, систем и методик НК, МС и ТД.

Идет активная работа по подаче тезисов, уже более 50 докладчиков подтвердили свое участие в Конференции. Успеете подать заявку.

СРОКИ ПОДАЧИ

Тезисы докладов принимаются до **01.09.2023 г.**

Распределение тезисов по тематическим секциям производится до **02.10.2023 г.**

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕЗИСАМ

- Язык конференции — русский
- Объем — до 2 стр. формата А4
- Шрифт — Times New Roman, кегель 11, поля 2 см со всех сторон, интервал одинарный.
- Название доклада — заглавными буквами, через два интервала фамилия и инициалы автора, название организации, города, страны, электронная почта автора (центрировать по ширине, интервал одинарный, прописными буквами)
- Структура: введение с указанием, какой теме посвящен доклад, основные результаты, обсуждение результатов, список литературы
- Иллюстрации выполняются с учетом последующего воспроизведения их средствами оперативной полиграфии; штриховые (чертежи, схема, графики, рисунки) — четкое контрастное изображение
- Использование макросов и встроенных объектов ActivX запрещено
- Формат файла — doc, rtf
- Название файла — фамилия и инициалы докладчика латинскими буквами Ivanov_V_V
- Если предоставляется более одного доклада, в конце необходимо добавить цифровой индекс:
Ivanov_V_V_1
Ivanov_V_V_2
- Место работы автора
- Электронная почта автора

Конференция проходит параллельно с X юбилейным международным Форумом «Территория NDT» — ключевым событием для специалистов и экспертов на территории СНГ. На выставке будут представлены перспективное оборудование и технологии применения средств НК, МС и ТД. В рамках деловой программы Форума будет проведен финальный этап конкурса «Дефектоскопист 2023», Молодежная научно-техническая конференция, Салон инноваций, вручены Национальные премии в области НК и ТД и награждены победители конкурса выпускных квалификационных работ «Новая генерация» профильных кафедр ВУЗов.

Ждем Вас 23-25 октября 2023 года в Москве, ЦВК Экспоцентр, павильон 2.4.

По вопросам участия в Конференции просим обращаться в Дирекцию РОНКТД



conf.ronktd.ru



info@ronktd.ru



+7 (499) 245-56-56

+7 (916) 619-00-17