Российская академия наук

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 6
2022

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, А.Х. Вопилкин, Д.С. Тихонов, С.А. Смотрова, В.И. Иванов. Контроль образцов из полимерных композиционных материалов с использованием ультразвуковых антенных решеток 3

Н.П. Алешин, Н.А. Щипаков, М.Н. Дегтярев. Моделирование процесса распространения ультразвуковых колебаний в анизотропном материале изделий, изготовленных по аддитивным технологиям 17

Цзян Пэн, Ли Кайруи, Чжан Люинь, Ли Вэй, Янь Сяовэй. Определение параметров разрушения сосудов для хранения водорода под высоким давлением с помощью ЦКИ и энтропии акустической эмиссии 26

Радиационные методы

А.Б. Коновалов, В.В. Власов, А.Н. Киселев. Разработка алгоритмов реконструкции изображений для малоракурсной компьютерной томографии в РФЯЦ—ВНИИТФ: история, современное состояние и перспективы 37

С.П. Осипов, С.А. Щетинкин, Е.Ю. Усачёв, С.В. Чахлов, О.С. Осипов. Восстановление сигналов со сцинтилляционных детекторов 48

Электромагнитные методы

В.Ф. Новиков, С.М. Кулак, К.Р. Муратов, А.С. Парахин. Связь магнитоупругой чувствительности магнитоупругого размагничивания сталей 60Г и 65Г с коэрцитивной силой и магнитострикцией 62

Информация 70

УДК 620.179.162:534.87

КОНТРОЛЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

© 2022 г. А.Е. Базулин[1,*], Е.Г. Базулин[1], А.Х. Вопилкин[1], Д.С. Тихонов[1], С.А. Смотрова[2,], В.И. Иванов[3,***]**

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

[2] ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), Россия 140180 Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1
[3] ЗАО «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр», Россия 119048, Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1
*E-mail: *bazulin@echoplus.ru; **svetlana.smotrova@tsagi.ru; ***ivi444@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2022; после доработки 24.04.2022
Принята к публикации 06.05.2022

Изучена возможность выявления подповерхностных расслоений в полимерных композиционных материалах (ПКМ), локальных зон с повышенным содержанием пор и внутренних инородных включений (технологических и эксплуатационных дефектов), а также интегральных нарушений структуры (ударных повреждений) путем проведения исследований образцов с искусственными дефектами (плоскодонными отверстиями) с использованием ультразвуковых антенных решеток. Показана принципиальная возможность применения антенных решеток с рабочей частотой 10 МГц для обнаружения и оценки параметров несплошностей, размеры которых порядка одного миллиметра. Для повышения качества изображения отражателей применялась процедура декорреляции эхосигналов и анализ когерентного фактора изображений. Приведены результаты контроля образцов ПКМ после нормированных ударов, которые говорят о перспективности применения ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) с использованием антенных решеток (АР).

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы (ПКМ), ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК), дефектометрия, антенная решетка, Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), тройное сканирование, C-SAFT, декорреляция структурного шума.

DOI: 10.31857/S013030822206001X; **EDN:** BMGAYP

1. ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении современных авиационных и космических конструкций в настоящее время все в большей степени применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Это связано с рядом положительных качеств этих материалов, из которых одним из основных можно назвать высокое соотношение прочность/вес конструкций. Конструкции, изготовленные из ПКМ, по прочности превосходят изделия из металлических сплавов. Сочетание в ПКМ компонентов с разными исходными свойствами позволяет получить требуемые прочностные и весовые характеристики. Это достигается за счет использования разнородных материалов — связующего/матрицы на основе полимерной смолы и армирующего наполнителя в виде высокопрочных/высокомодульных волокон.

С начала применения ПКМ в летательных аппаратах (ЛА) в 1970-х годах объем их использования в авиастроении существенно возрос. Применение ПКМ в производстве авиационной и космической техники дает возможность экономить от 5 до 40 % веса ЛА. Благодаря своим свойствам ПКМ заменили некоторые привычные металлические сплавы. Так, например, в конструкции планера магистрального самолета Boeing B-787 доля ПКМ составляет более 30 %, а в некоторых ЛА доходит до 60 %.

Однако надежность конструкций из ПКМ в ряде случаев уступает надежности металлических конструкций, свойства которых достаточно хорошо изучены. Сложность и неоднородность структуры ПКМ способствует появлению в элементе контроля разнообразных несплошностей (трещины в матрице, разрыв волокон, расслоения, поры и т.п. [1]), которые могут привести не только к ухудшению его прочностных свойств, но и стать причиной разрушения [2—6]. Кроме того, ПКМ подвержены «старению», т.е. под действием внешних нагрузок и факторов окружающей среды склонны к деградации эксплуатационных свойств со временем.

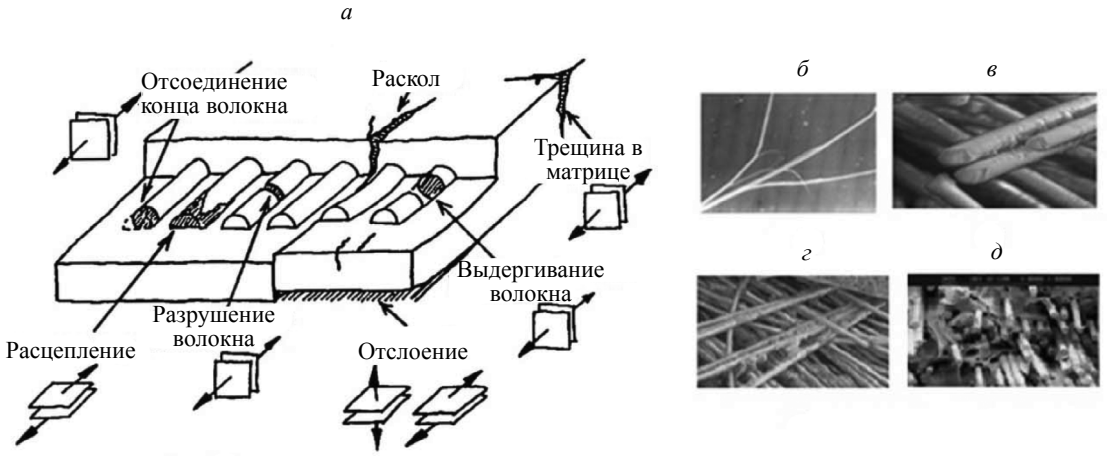

Рис. 1. Возможные виды дефектов (*а*) и картины разрушения волокон композиционного материала (*б*—*д*).

Количество видов несплошностей (повреждений и дефектов) в ПКМ составляет 10-12 наименований, что в несколько раз превышает их число в металлических материалах [7—9]. На рис. 1 показаны основные виды несплошностей в ПКМ.

Нарушение сплошности материала (Тип I — нормальный отрыв), показанные на рис. 1*а*:

1) отсоединение конца волокна; разрушение волокна;
2) расслаивание (межслойная трещина или отслоение);
3) выдергивание волокна;
4) трещина в матрице;
5) раскол.

Сдвиговый вид разрушения (Тип II и III — поперечный или продольный сдвиг):

6) отслоение;
7) раскол;
8) расцепление.

Если ПКМ состоит из нескольких слоев, то возникает еще один вид разрушения:

9) расслаивание для многослойных объектов, аналогичное отслоению, которое указано для образца на рис. 1*а* [7].

На рис. 1 приведены фотографии разрушения волокон и связующего: разрушение арамидных волокон метелкой (*б*); разрушение волокон (*в*, *г*); разрушение волокон и связующего (*д*). Фотографии взяты из разных источников, ссылки на которые приведены в [8].

Несплошности ПКМ классифицируются следующим образом [7]:

по происхождению: 1) в процессе изготовления (производственные дефекты); 2) на стадии хранения; 3) при транспортировке; 4) в процессе эксплуатации (эксплуатационные повреждения);

в зависимости от размера: 1) макронесплошности (свыше 100 мкм); 2) мезонесплошности (60—100 мкм); 3) микронесплошности (до 60 мкм);

по местоположению в объекте: 1) поверхностные; 2) в объеме материала; 3) выходящие на кромку детали;

по глубине залегания;

в зависимости от раскрытия, формы и ориентации по строительным осям детали.

2. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

В связи с актуальностью проблемы повышения надежности ЛА (вследствие необходимости контроля изменения характеристик конструкции при эксплуатации) встает вопрос НК композитных элементов и агрегатов на всех стадиях жизненного цикла — от проектирования до вывода из эксплуатации. Большое число видов дефектов и повреждений в ПКМ, чрезвычайная сложность структуры этих материалов существенно усложняет процесс выявления несплошностей с использованием методов НК и ухудшает достоверность их обнаружения.

Согласно [9—12], для контроля конструкций из ПКМ предпринимаются попытки использовать такие виды НК, как радиационный, тепловизионный, шерографический, визуально-измерительный, акустическая эмиссия и другие. Всего видов НК, используемых для контроля разнообразных объектов, насчитывается более 10, а методов и методик, детализирующих виды НК, более 50. Однако чрезвычайная сложность структуры ПКМ приводит к тому, что до сих пор не выбран оптимальный метод и методика, которые можно было бы использовать с удовлетворительными результатами для выявления дефектов и повреждений для любых условий эксплуатации композитных авиаконструкций.

Одним из наиболее эффективных методов выявления дефектов и повреждений в ПКМ и измерения их параметров является ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК) [10, 13]. Опыт многолетнего промышленного использования УЗК в различных отраслях доказал его хорошую чувствительность, высокую точность измерения параметров различных несплошностей (трещин, расслоений, пор, других дефектов и повреждений), возможность использования в различных ситуациях, включая контроль в полевых условиях. Согласно [7], акустические методы (УЗК и АЭ) являются самыми распространенными методами для выявления наибольшего числа несплошностей в ПКМ при разнообразных условиях контроля. Для контроля композитных конструкций применяется также импедансный метод [14], методы, использующие прямые совмещенные и раздельно-совмещенные преобразователи, а также методы, основанные на особенностях распространении в объекте контроля волн Лэмба [13, 15—17], методы лазерной виброметрии [18]. После внедрения технологии фазированных антенных решеток для УЗК объектов из металла решение задачи дефектометрии вышло на новый уровень [19]. В результате исследователи получили возможность перейти к решению задачи диагностики изделий из ПКМ с оценкой риска аварии.

Диапазон частот ультразвуковых колебаний при использовании УЗК лежит в пределах от 50 КГц до 25 МГц, что позволяет контролировать объекты с высоким затуханием ультразвуковых волн (низкочастотный диапазон от 50 КГц до 1,0 МГц) и выявлять несплошности весьма малых размеров (диапазон частот выше 5 МГц). Поэтому важной задачей НК в настоящее время является определение возможностей применения пьезоэлектрических антенных решеток (АР) при нахождении и измерении параметров дефектов в конструкциях из ПКМ. Применение АР вместо одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) позволяет обеспечить предельную фокусировку порядка длины волны волны по всей области восстановления изображения отражателей и повысить скорость сканирования, так как в направлении расположения элементов АР ее можно перемещать с шагом 10 и более миллиметров. Применение фокусирующих ПЭП позволяет повысить разрешающую способность изображения, но только в области фокуса. Для получения предельной фокусировки изображения по всей глубине объекта контроля система сканирования должна перемещать фокусирующей ПЭП перпендикулярно поверхности объекта контроля, что усложняет конструкцию системы сканирования и увеличивает время сканирования.

Задача выбора наиболее подходящего метода НК и методик дефектометрии композитных конструкций продолжает оставаться актуальной, и поэтому необходимо проводить большой объем поисковых работ для выбора оптимального метода и методики. В данной статье приведены результаты изучения возможности выявления подповерхностных расслоений в полимерных композиционных материалах (ПКМ), локальных зон с повышенным содержанием пор и внутренних инородных включений (технологических и эксплуатационных дефектов), а также интегральных нарушений структуры (ударных повреждений) путем проведения исследований образцов с искусственными дефектами (плоскодонными отверстиями) с использованием АР на 10 МГц.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ МЕТОДОМ ЦФА

В настоящее время в УЗК широкое применение нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием АР: фазированные антенные решетки (ФАР) [20, 21] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [22]. В работе [23] обе технологии сравниваются и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображений несплошностей — акустических отражателей.

На первом этапе ЦФА-технологии регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов АР. Такой режим называется режим двойного сканирования (в зарубежной литературе: Full Matrix Capture — FMC [24]). Набор эхосигналов при излучении одним элементом АР называется «выстрелом», а набор эхосигналов по всем «выстрелам» будем называть «залп». На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [25] восстанавливается изображение отражателей. В зарубежной литературе используют название

Total Focusing Method — TFM [26]. Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей с лучшей для линейных методов фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). Совместная обработка эхосигналов, измеренных АР при перемещении ее в направлении, например, поперечном сварному соединению, понижает уровень шума и повышает фронтальную разрешающую способность изображения. Такой метод получения изображения будем называть далее ЦФА-Х.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Поисковые эксперименты по применению метода ЦФА-Х для НК образцов ПКМ проводили с использованием дефектоскопа «АВГУР-АРТ^{2020}» [27]. На рис. 2 показана блок-схема экспериментальной установки, состоящей из электронного блока, иммерсионной ванны, двухкоординатной системы сканирования с механизмом фиксации, позволяющим выбрать нужные углы наклона АР к плоскости образца. На рис. 3 показана фотография экспериментальной установки. Ультразвуковые эхосигналы регистрировали с использованием 16-элементной АР с рабочей частотой 10 МГц. Для выполнения поисковых экспериментов применяли образцы углепластиков двух типов: с плоскодонными отверстиями и с нормированным ударным повреждением.

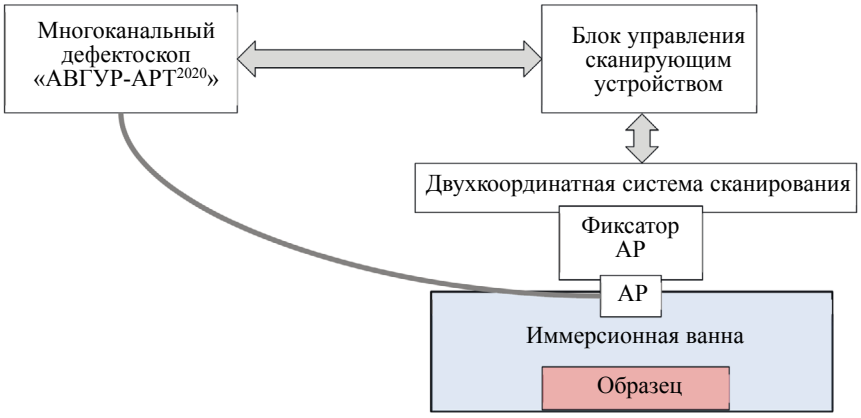

Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки.

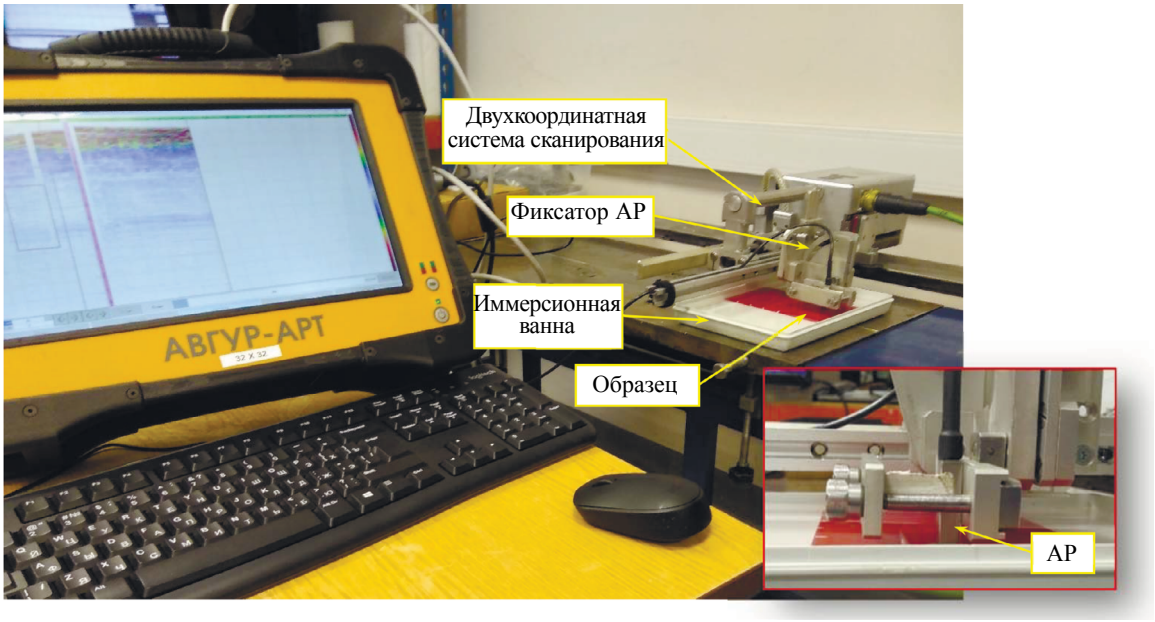

Рис. 3. Фотография экспериментальной установки.

4.1. Образец с плоскодонными отверстиями

Образцы в виде пластин из различных пластиков (стекло-, угле-, органопластики и др.) с глухими плоскодонными отверстиями (ПДО) являются стандартными образцами для моделирования несплошности типа «непроклей/расслоение», составляющие вторую группу по степени опасности, связанной с относительным снижением прочности ПКМ. В качестве дополнительных требований к стандартным образцам выступают следующие условия [28]:

обеспечение близости величин толщин обшивок к значениям толщин натурных панелей, что позволяет осуществить проверку не только поведения монослоя материала, но и совокупности монослоев в композитных пакетах с различными укладками и количеством слоев;

наличие схем типовых укладок, в которых ориентация волокон наиболее полно отражает работу натурной конструкции.

На рис. 4 показана фотография обратной стороны настроечного углепластикового образца АП-13 размерами $x \times y \times z = 150 \times 100 \times 6$ мм после изготовления в нем ПДО диаметром 8, 4, 2 и 1 мм с разными глубинами засверловки 4, 2 и 1 мм. Образец вырезан из подкрепленной стрингерами углепластиковой панели. На лицевую сторону образца нанесено типовое лакокрасочное покрытие на основе полиуретановой эмали PPG Aerospace CA40000RAL3000 (огненно-красный цвет). Укладка многослойного армирующего наполнителя (углеродного полотна) квазиизотропная. Остатки полок стрингеров расположены вдоль длинных сторон образца. В центре образца АП-13 вдоль оси x его толщина равна 5 мм, а по краям — 6,5 мм. Скорость продольной ультразвуковой волны, измеренная толщиномером, равна 3 мм/мкс (3 км/с).

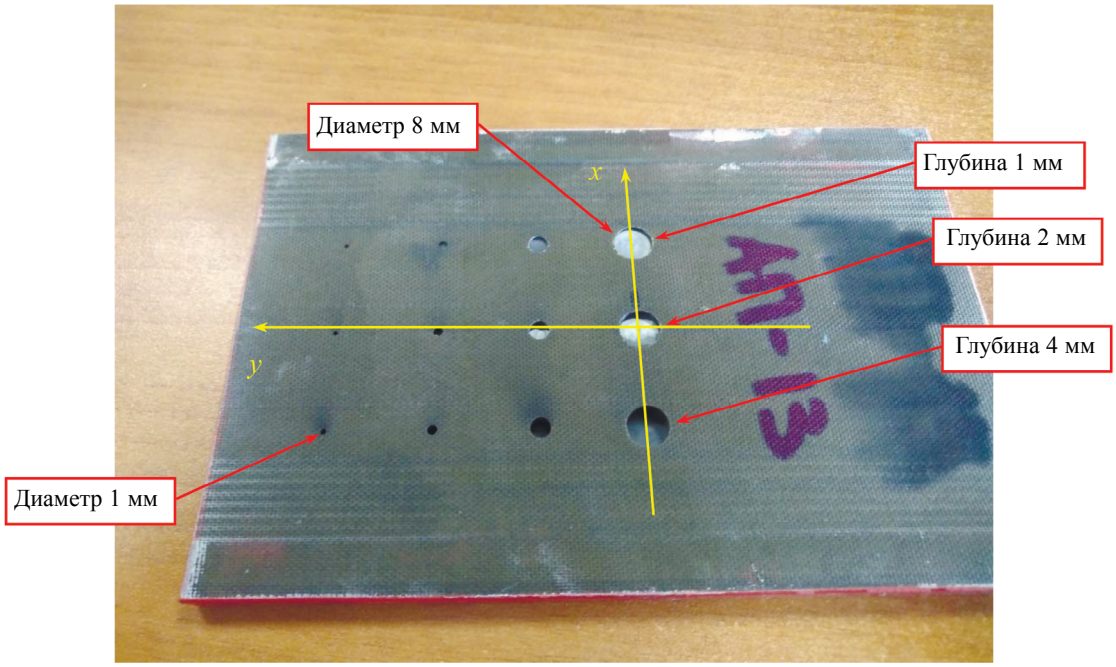

Рис. 4. Фотография обратной стороны образца АП-13 с 12 ПДО разного диаметра с разными глубинами засверловки.

4.1.1. Зарегистрированные эхосигналы

На рис. 5 в растровом виде показаны эхосигналы при сканировании по оси x с шагом 1 мм над ПДО диаметром 2 мм (см. рис. 4). Хорошо видны эхосигналы, отраженные от поверхности и дна образца АП-13, от ПДО диаметром 2 мм с глубинами засверловки 1 и 2 мм. По эхосигналам от поверхности можно сделать вывод, что образец установлен непараллельно линии перемещения АР и это обстоятельство в дальнейшем учитывалось при восстановлении ЦФА-Х-изображения отражателей. Эхосигналы дна повторяют неровную форму дна образца АП-13. Наличие армирующего углеродного наполнителя с квазиизотропной укладкой приводит к многократному переотражению

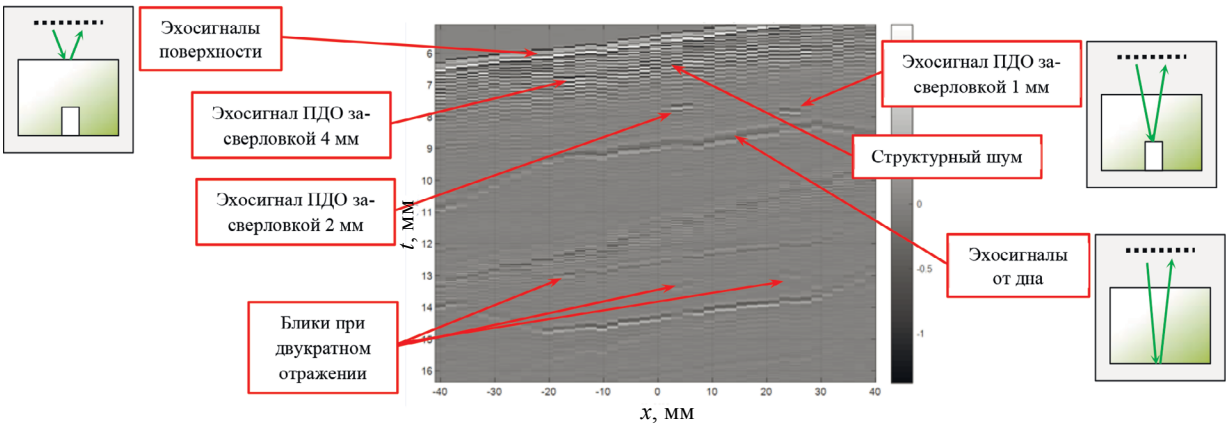

Рис. 5. Эхосигналы ПДО диаметром 2 мм на разных глубинах засверловки; пиктограммами схематически показаны лучи, формирующие эхосигналы.

и рассеиванию ультразвуковых импульсов. В результате возникает структурный шум, на фоне которого эхосигналы ПДО диаметром 2 мм с засверловкой на глубину 4 мм практически незаметны. Уменьшение уровня структурного шума у дна углепластикового образца можно объяснить тем, что из-за многочисленных отражений и затухания между слоями ПКМ амплитуды эхосигналов значительно уменьшаются.

4.1.2. ЦФА-Х-изображения

4.1.2.1. ПДО диаметром 2 мм

На рис. 6 показано ЦФА-Х-изображение ПДО засверловкой на глубину 4 мм. На рисунке линиями красного цвета нанесены границы образца АП-13 и ПДО. В отличии от изображения, приведенного на рис. 5, блик ПДО засверловкой глубиной 4 мм уверено можно обнаружить по критерию превышения его амплитуды на 6 дБ по отношению к структурному шуму. Это объясняется тем, что восстановление изображения отражателей методом ЦФА-Х повышает отношение сигнал/шум даже для структурного шума, хотя не так эффективно как для «белого» шума [29].

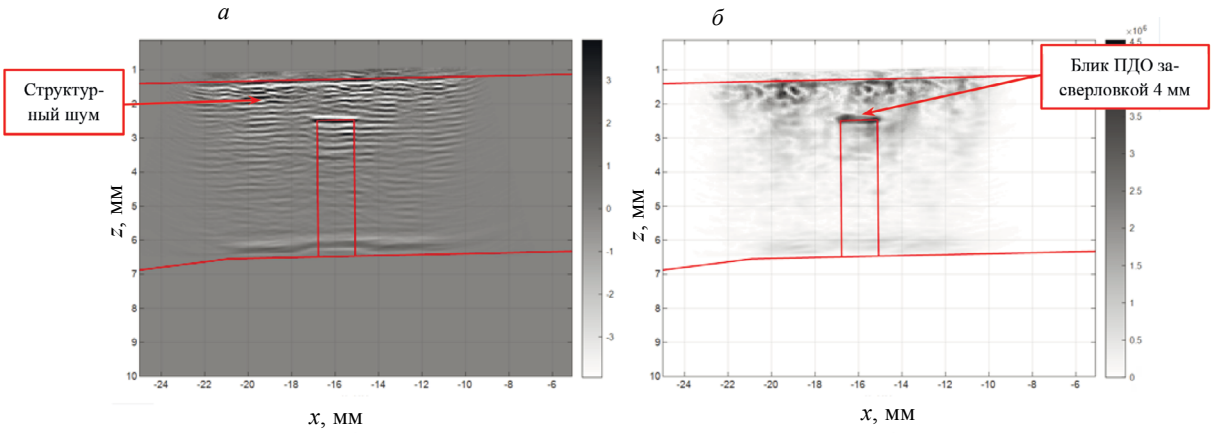

Рис. 6. ЦФА-Х-изображение ПДО засверловкой на глубину 4 мм:
а — реальная часть изображения (контрастность 0,5); *б* — модуль изображения (контрастность 1).

На рис. 7 представлена реальная часть ЦФА-Х-изображения ПДО диаметром 2 мм. Контрастность изображений равна 0,5. Блики ПДО уверено видны, поэтому можно утверждать, что предложенный подход позволяет уверенно обнаруживать ПДО диаметром 2 мм по всей толщине образца.

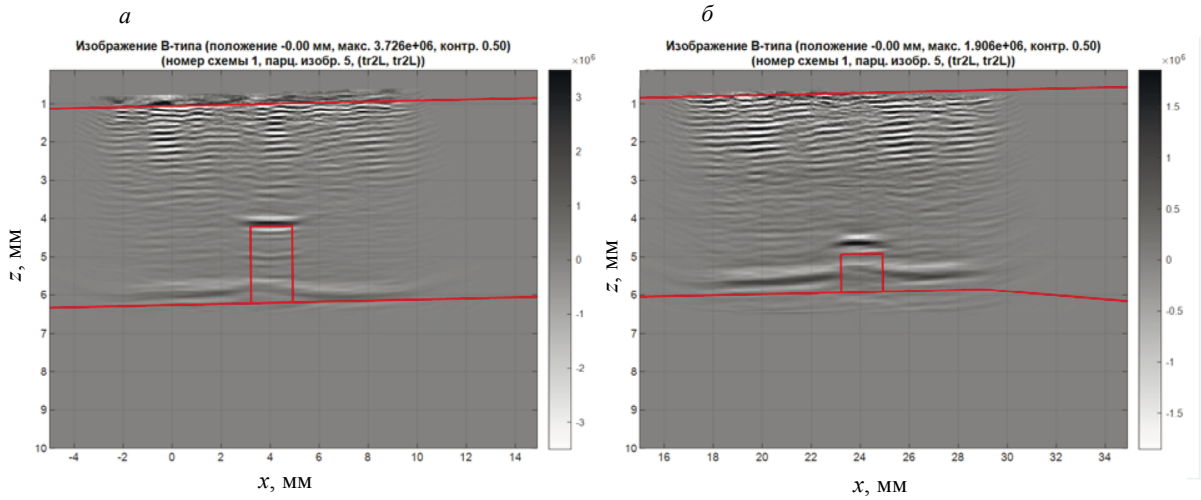

Рис. 7. Реальная часть ЦФА-Х-изображения ПДО диаметром 2 мм:
а — засверловка на глубину 2 мм; *б* — на глубину 1 мм.

4.1.2.2. ПДО диаметром 1 мм

На рис. 8 показана реальная часть ЦФА-Х-изображения ПДО диаметром 1 мм и дна образца. Видно, что блики ПДО обнаружить сложно по причине того, что эхосигналы от вершин ПДО уменьшили амплитуду сигнала, а их блики на изображении стали соизмеримы с амплитудой структурного шума.

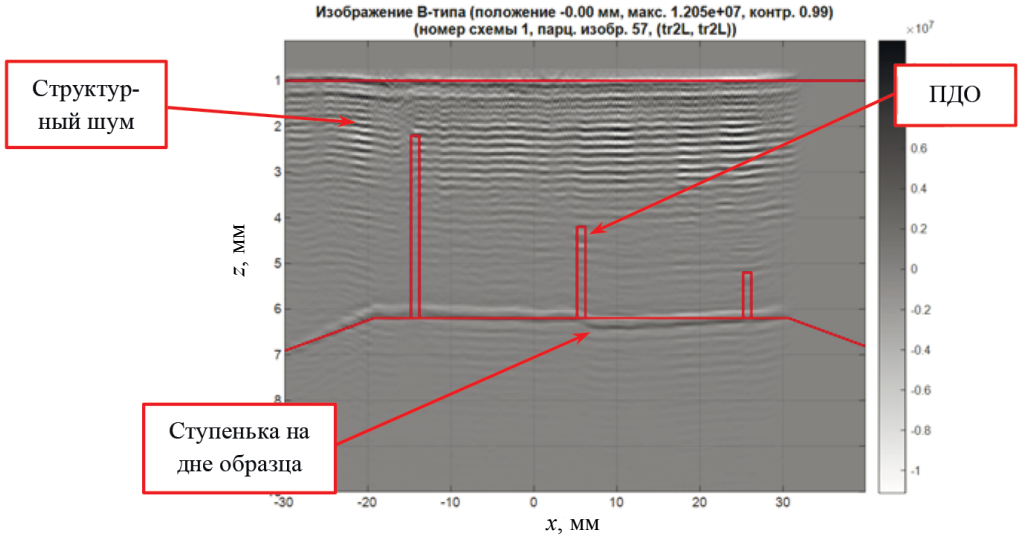

Рис. 8. Реальная часть ЦФА-Х-изображения ПДО диаметром 1 мм и дна образца АП-13.

Известно, что для уменьшения уровня структурного шума разработаны различные подходы: процедура декорреляции [30], восстановление изображений отражателей с учетом перерассеивания [31], восстановление изображений отражателей при решении обратной коэффициентной задачи [32]. На рис. 9*а* показан модуль изображения ПДО диаметром 1 мм с засверловкой глубиной 2 мм. Блик ПДО формально не обнаружен, так как его амплитуда примерно на 4 дБ превышает уровень шума. На рис. 9*б* справа показано изображение, восстановленное по декоррелированным эхосигналам, по которому уже можно обнаружить блик ПДО.

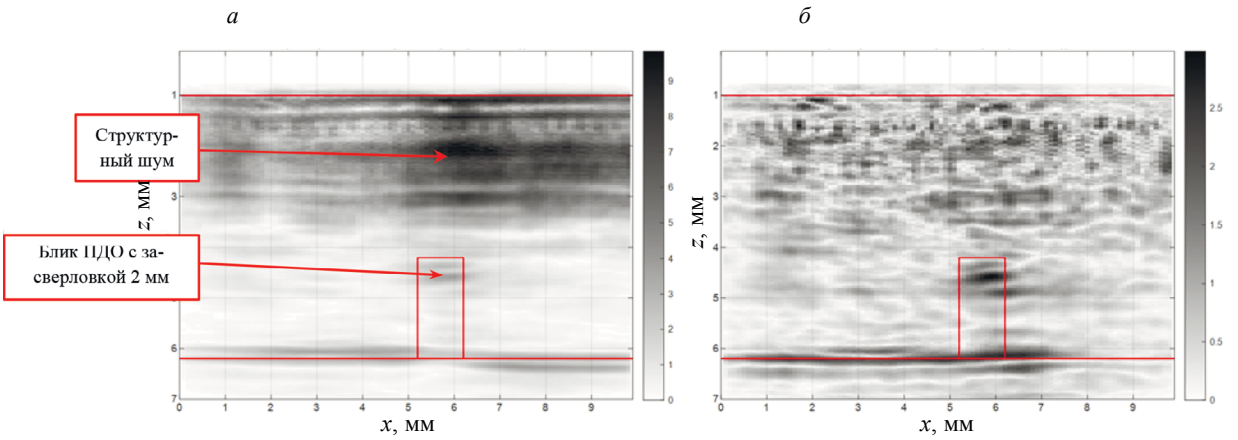

Рис. 9. Исходное ЦФА-Х-изображение ПДО диаметром 1 мм с засверловкой глубиной 2 мм:
а — исходное изображение; *б* — восстановленное по эхосигналам изображение после процедуры декорреляции.

Для дополнительного повышения качества ЦФА-Х-изображения можно формировать изображение с учетом когерентного фактора [33]. На рис. 10 блик ПДО можно уверенно обнаружить, так как его амплитуда после дополнительной обработки более чем на 12 дБ превышает уровень структурного шума. Отметим, что на поверхности образца АП-13 стал заметен блик от пузырька газа, так как в иммерсионную ванну при выполнении экспериментов заливалась недегазированная вода. Кроме того, на глубине около 1,5 мм наблюдается регулярная структура бликов с периодом около 0,5 мм, связанная с расположением углеродных волокон наполнителя.

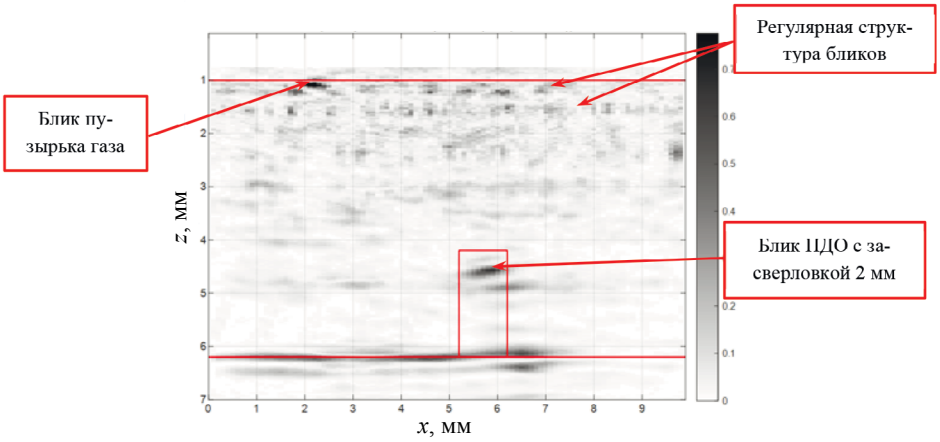

Рис. 10. Исходное ЦФА-Х-изображение ПДО диаметром 1 мм с засверловкой на глубину 2 мм, восстановленное по эхосигналам после процедуры декорреляции и с учетом когерентного фактора.

4.1.2.3. Восстановление трехмерного изображения образца

К сканированию вдоль оси *x* было добавлено сканирование вдоль оси *y* с шагом 2 мм. Как упоминалось ранее, для восстановления изображения нужно получить информацию о форме образца и учесть ее при формировании ЦФА-Х-изображения. Используя информацию о времени прихода импульса, отраженного от поверхности образца АП-13, можно восстановить форму плавно меняющейся поверхности (рис. 11) и далее учесть это при восстановлении изображения отражателей (несплошностей).

На рис. 12 приведены изображения всех типов (B, C и D) внутренней структуры образца и срез изображения вдоль оси *z*, перпендикулярной поверхности образца. Изображения B-типа показывает срезы в плоскости *xz* (см. рис. 4), D-типа — в плоскости *yz*, а C-типа — в плоскости

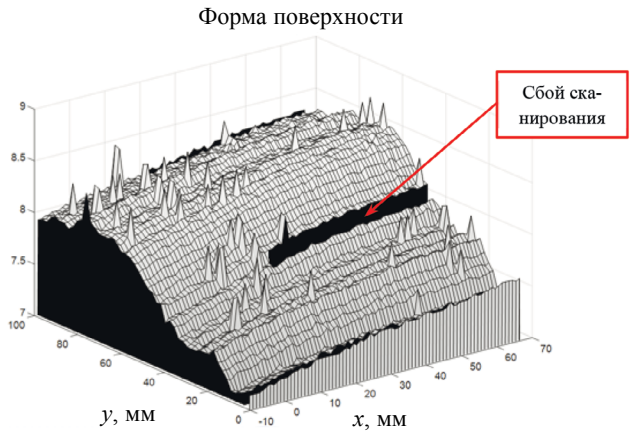

Рис. 11. Профиль поверхности объекта контроля.

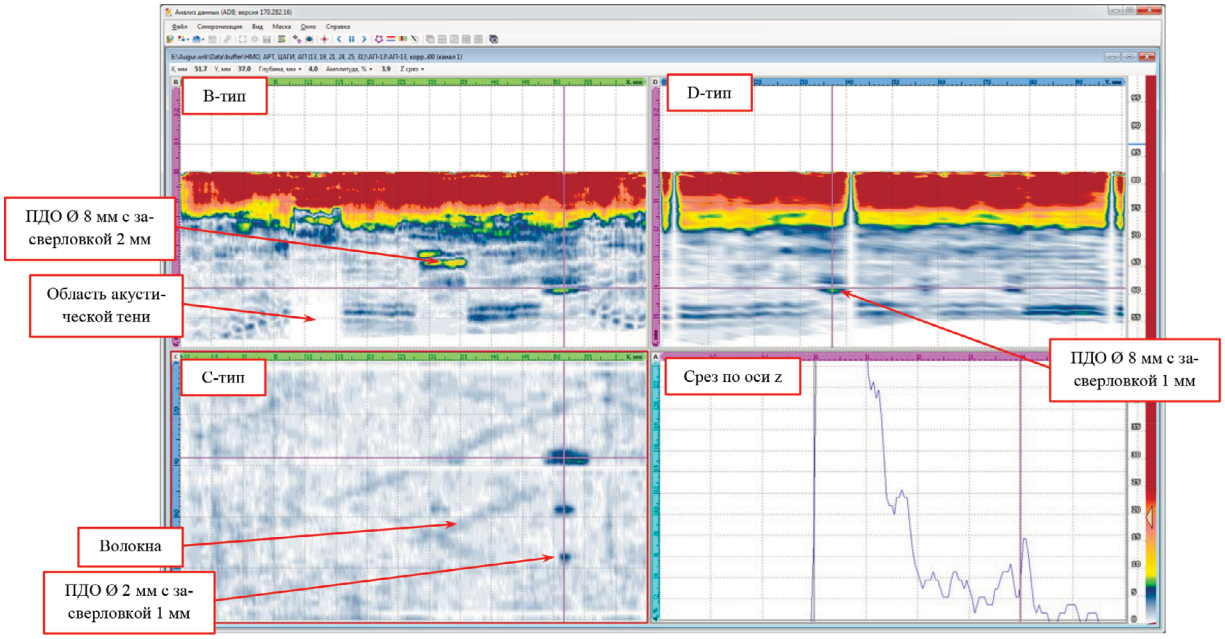

Рис. 12. ЦФА-Х-изображения B-, C- и D-типа внутренней структуры образца АП-13.

xy. На изображении B-типа можно наблюдать блики ПДО диаметром 8 мм с глубиной засверловки 2 и 1 мм. От ПДО диаметром 8 мм с засверловкой 4 мм хорошо видна акустическая тень, наличие которой можно использовать для определения размеров отражателя. Этот принцип подобен работе с радиолокационной тенью при обнаружении самолетов с малой радиолокационной заметностью. На изображении D-типа видны блики ПДО диаметром 8, 4 и 2 мм с засверловкой 1 мм, а на изображении C-типа можно наблюдать блики ПДО диаметром 8, 4 и 2 мм с засверловкой 1 мм.

На рис. 13 показано ЦФА-Х-изображение C-типа, полученное следующим образом. Из полного изображения (в виде куба чисел) была выделена трехмерная область с бликом дна. Для получения объединенного двумерного изображения C-типа из трехмерного изображения для каждой точки *xy* оставлялось максимальное значение вдоль оси *z*. Такую операцию будем называть объединение по максимуму вдоль оси *z*. Контрастность изображения была увеличена на 6 дБ. На рис. 13 на блике дна образца хорошо видны акустические тени ПДО диаметром 8, 4 и 2 мм на любых глубинах засверловки. Тени ПДО диаметром 1 мм обнаружить не удается. На рисунке видны две горизонтальные линии, возникшие из-за сбоя при сканировании.

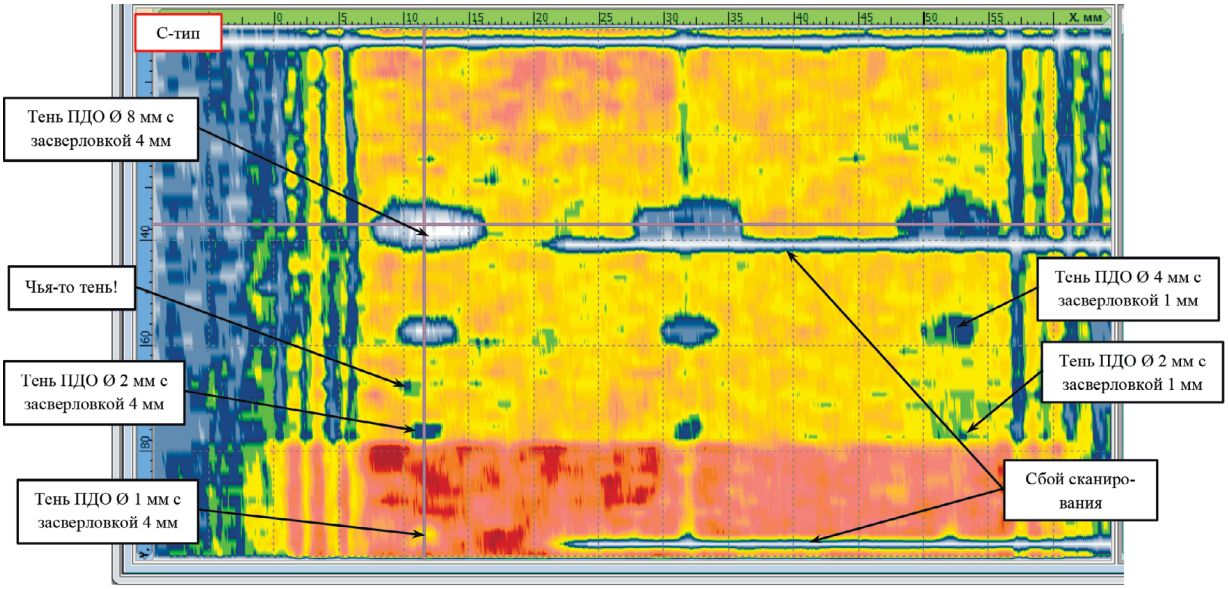

Рис. 13. ЦФА-Х-изображение С-типа, объединенное по максимуму вдоль оси *z*.

4.2. Образец с ударными повреждениями

Образцы с нормированными ударными повреждениями используют для определения прочности на сжатие после повреждения (удара) согласно [34]. На первом этапе образец для испытаний подвергают воздействию поперечного, локального удара с помощью копра — установки для испытания на удар падающим грузом с полусферическим индентором. На втором этапе устанавливают тип повреждения после удара методом неразрушающего контроля (этой проблеме и посвящена статья) и измеряют глубину вмятины после удара. На третьем этапе к образцу для испытаний прикладывают сжимающую нагрузку до разрушения. Вычисляют предел прочности при сжатии после удара, модуль упругости при сжатии после удара и продольную деформацию при сжатии после удара.

Нормированные ударные повреждения наносились, в соответствии с методикой, стальным цилиндрическим бойком массой 5,50±0,25 кг с гладким полусферическим наконечником диаметром 24,5±0,1 мм на испытательном копре с вертикально падающим грузом INSTRON Dynatup 9250HV. При этом для крепления образцов при выполнении экспериментов использовали специальное зажимное приспособление для испытаний на удар падающим грузом, показанное на рис. 5, по ГОСТ 33844—2016 [34]. На рис. 14 показана фотография углепластикового образца АП-12 с

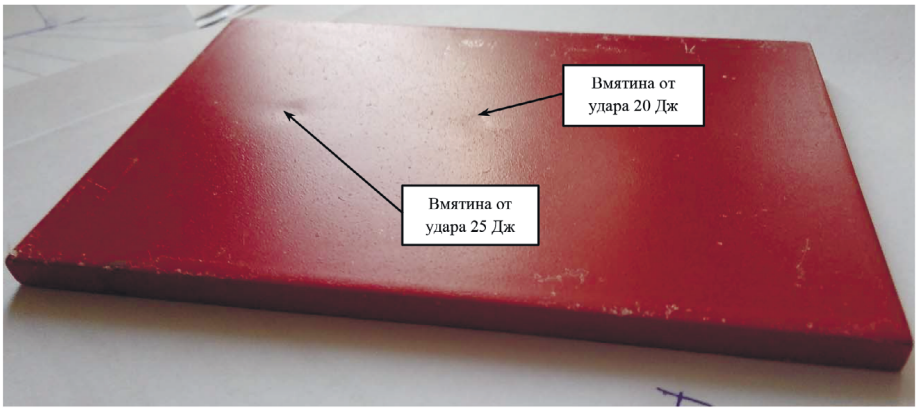

Рис. 14. Фотография образца АП-12 с вмятинами от ударных воздействий.

двумя вмятинами — последствиями нормированных ударов 20 (в центре) и 25 Дж. Образец АП-12 аналогично АП-13 представляет собой пластину размерами $x \times y = 150 \times 100$ мм, вырезанную из подкрепленной стрингерами углепластиковой панели (остатки полок стрингеров расположены вдоль его длинных сторон). Аналогично образцу АП-13 на лицевую сторону образца АП-12 нанесено типовое лакокрасочное покрытие на основе полиуретановой эмали PPG Aerospace CA40000RAL3000. АП-12 отличается от настроечного образца АП-13 толщиной, которая без учета полок стрингеров равна 6,7 мм, и видом армирующего наполнителя: он представляет собой ровинговую углеткань с квазиизотропной укладкой. Регистрация эхосигналов и восстановление изображений проводились так, как описано в разделе 4.1.2.3.

4.2.1. ЦФА-Х-изображения

На рис. 15 показано изображение ЦФА-Х-изображение В-типа при аппроксимации поверхности образца квадратичной кривой Безье при сканировании АР вне областей ударов. Хорошо видна тканая структура ровинга — чем ближе к поверхности, тем лучше она проявляется, и чем дальше от поверхности, тем больше сказывается затухание эхосигналов, что приводит к уменьшению их амплитуды. Это изображение интересно сравнить с рис. 5. Видно, что ЦФА-Х-изображения структур армирующих наполнителей образцов АП-13 и АП-12 разные.

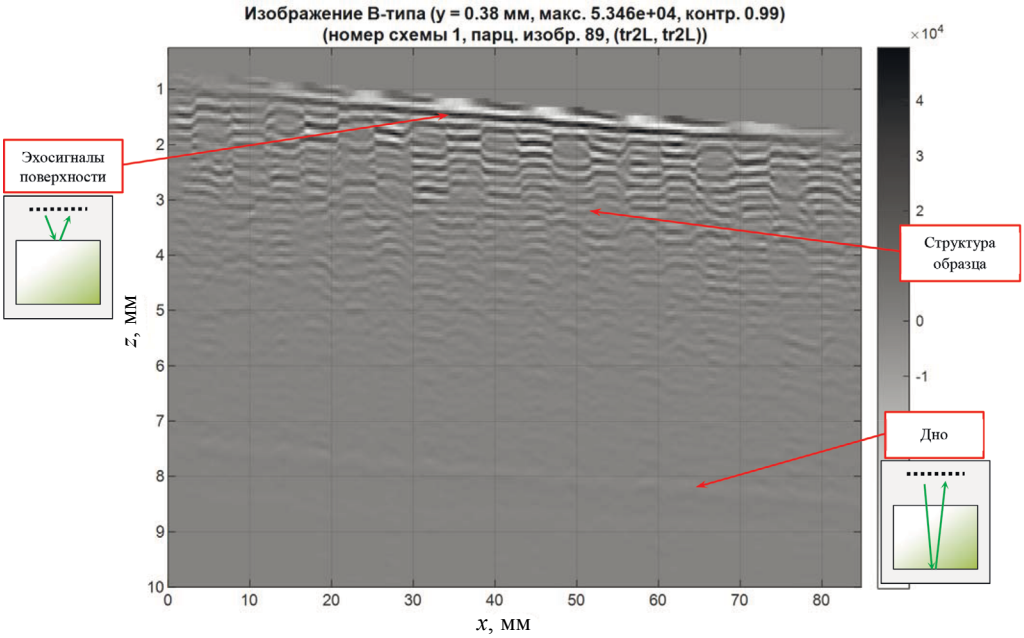

Рис. 15. ЦФА-Х-изображение В-типа вне области повреждения.

На рис. 16 показаны ЦФА-Х-изображения внутренней структуры образца, на которых видны области, где произошел разрыв волокон, в результате чего формируются области теней, заметные на изображениях В- и D-типа. На этих изображениях можно проследить за расширением области повреждения образца при приближении к дну. На изображении С-типа, сформированном на глубине 1,1 мм, хорошо видны повреждения, размеры которых примерно совпадают с размерами вмятин, отмеченных на рис. 14, а также периодическая структура ровинговой углеткани.

На рис. 17 показано ЦФА-Х-изображение С-типа, объединенное по максимуму вдоль оси z. На рис. 17 отлично видна тень из-за повреждения структуры образца от ударов 20 и 25 Дж. Усредненные радиусы областей разрушений от ударных воздействий при приближении к дну увеличились примерно в 3 раза по сравнению с их величиной на глубине 1,1 мм (см. рис. 16) и достигли значения 15 мм.

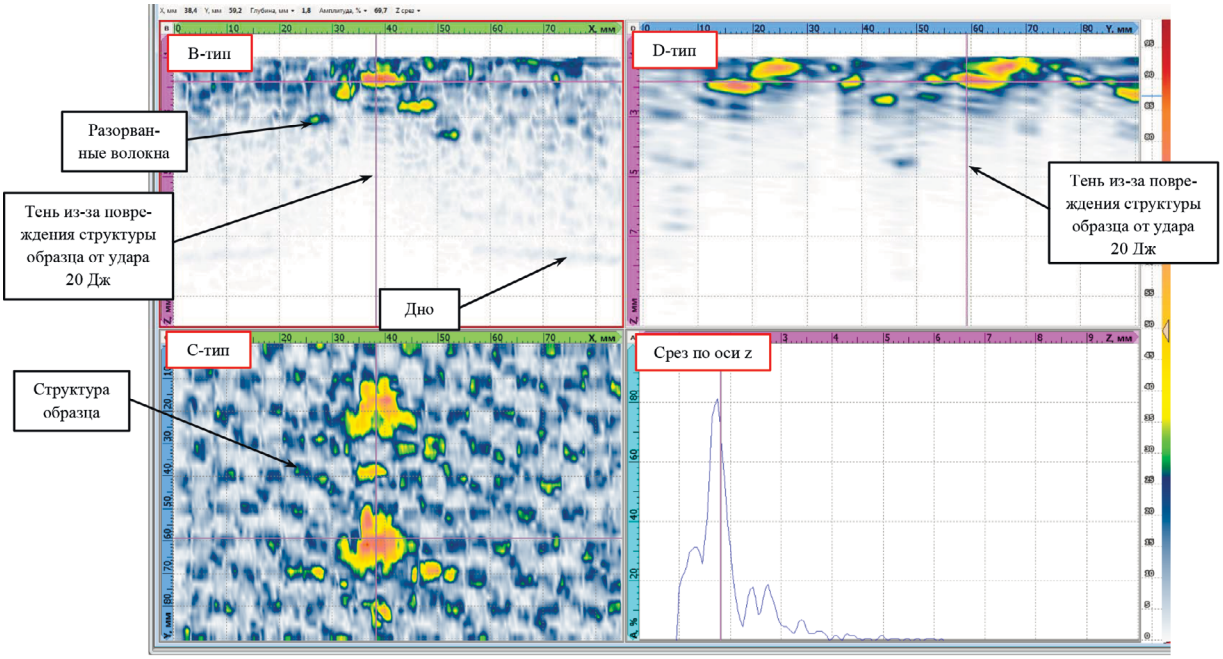

Рис. 16. ЦФА-Х-изображения B-, C- и D-типа внутренней структуры образца АП-12 после воздействия нормированных ударов.

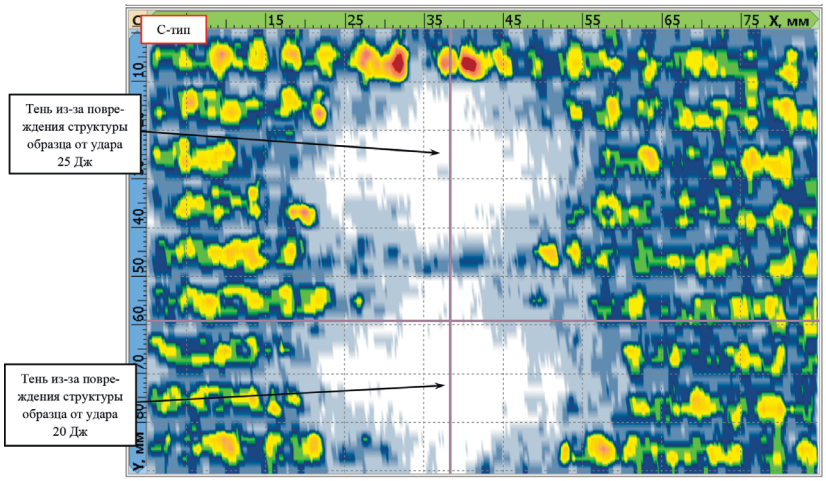

Рис. 17. ЦФА-Х-изображение C-типа, объединенное по максимуму вдоль оси *z*.

ВЫВОДЫ

По результатам выполненных поисковых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Показано, что образцы ПКМ с толщиной стенки 6±2 мм могут быть достаточно успешно проконтролированы с использованием 16-элементной антенной пьезоэлектрической решетки с рабочей частотой 10 МГц с применением технологии ЦФА-Х. ПДО диаметром 2 мм и более уверенно обнаруживаются по всей толщине образца.

2. Обнаружить ПДО диаметром 1 мм можно после уменьшения уровня структурного шума с помощью метода декорреляции эхосигналов и анализа когерентного фактора изображения (см. рис. 9*б* и рис. 10).

3. Для повышения качества изображения отражателей использовался метод ЦФА-Х, учитывающий неровную поверхность образца, которая аппроксимировалась кривой Безье второго порядка, и непараллельность поверхности образца и линии сканирования АР (см. рис. 5 и рис. 11).

4. Контроль образцов из ровинговой углеткани с квазиизотропной укладкой после нанесения ударных повреждений показал:

оценить степень повреждения у поверхности образца можно по бликам мест разрыва углеткани (см. рис. 16);

акустическая тень на дне образца от повреждений позволяет точнее определить их размеры по всей толщине образца (см. рис. 17).

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ЦАГИ» Е.А. Боеву и А.Г. Калинину и специалистам фирмы «Авиапокрас» за помощь в подготовке образцов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.002—2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.

2. *Мурашов В.В., Алексашин В.М.* Контроль прочности зоны соединения элементов интегральных конструкций из полимерных композитов ультразвуковым методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 7. С. 15—19.

3. *Мурашов В.В.* К вопросу определения упругих и прочностных свойств полимерных композиционных материалов акустическим комплексным методом // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 11. С. 39—45.

4. *Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A.* Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // Ultrasound. Kaunas: Tecnologija. 2006. № 2. P. 7—10.

5. *Мурашов В.В.* Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 465—475.

6. C*hu Y.C., Rokhlin S.I.* Comparative analysis of through-transmission ultrasonic bulk wave methods for phase velocity measurements in anisotropic materials // J. Acoustic. Soc. Am. 1994. V. 95. No. 6. P. 3204.

7. *Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.* Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть I. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. С. 23—31.

8. *Иванов В.И., Белов П.А., Насибуллин Т.С.* Виды источников акустической эмиссии в композиционных материалах // Контроль. Диагностика. 2016. № 10. С. 14—20.

9. *Suzuki H., Takemoto M., Ono K.* A Study of Fracture Dynamics in a Model Composite by Acoustic Emission Signal Processing // Journal of Acoustics Emission. 1993. V. II. No. 3. P. 117—128.

10. ГОСТ Р 56787—2015. Композиты полимерные. Неразрушающий контроль. М.: Стандартинформ, 2016. 71 с.

11. *Смотрова С.А., Иванов В.И., Смотров А.В., Кускова А.Н., Мантрова Ю.В.* Определение рабочего диапазона чувствительности люминесцентного смарт-покрытия по результатам ультразвуковых измерений параметров ударных повреждений // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 9. С. 26—33.

12. *Сясько В.А.* Возможности применения методов активной термографии для оперативного неразрушающего контроля высокотехнологичных композиционных и металлических изделий в процессе их изготовления и эксплуатации / Сб. трудов 2-й Международной научно-технической конференции НККМ-2016 «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов». Санкт-Петербург, 7—9 декабря 2016 г. С. 132—142.

13. Неразрушающий контроль / Справочник в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.

14. *Ланге Ю.В.* Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.

15. *Sabeti S., Leckey C., De Marchiz L., Harley J.* Sparse wavenumber recovery and prediction of anisotropic guided waves in composites // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelec-trics, and Frequency Control. 2019. Aug. V. 66. No. 8. P. 1352—1363. DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2918746

16. *Wang W., Zhang H., Lynch J.P., Cesnik C.E.S., Li H.* Experimental and numerical validation of guided wave phased arrays integrated within standard data acquisition systems for structural health monitoring // Struct. Control Health Monit. 2018. V. 25. e2171.

17. *Taheri H., Du J., Delfanian F.* Experimental Observation of Phased Array Guided Wave Application in Composite Materials // Mater. Eval. 2017. V. 75. P. 1308—1316.

18. *Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Нехорошев В.О., Шпильной В.Ю., Дружинин Н.В.* Особенности лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов с использованием воздушно-связанных ультразвуковых преобразователей // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 26—38.

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

20. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/(дата обращения: 26.11.2020).

21. *Taheri H., Hassen A.A.* Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic // Appl. Sci. 2019. V. 9. No. 8. P. 1—16. DOI:10.3390/app9081628

22. *Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.* О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.

23. *Базулин Е.Г.* Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.

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

25. *Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н.* Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.

26. *Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.

27. Сайт фирмы «ЭХО+». URL: http://www.echoplus.ru/ (дата обращения: 02.03.2021).

28. *Зиченков М.Ч., Ковалев И.Е., Ковалев Н.И., Корнилов А.Б., Корнилов Г.А., Смотров А.В., Смотрова С.А.* Концептуальные аспекты разработки перечня стандартных образцов из ПКМ для развития методологии активного теплового неразрушающего контроля изделий // Авиационная промышленность. 2021. № 1. С. 1—11.

29. *Карташев В.Г., Качанов В.К., Шалимова Е.В.* Основные положения теории пространственно-временной обработки сигналов применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии изделий из сложноструктурых материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 19—29.

30. *Bazulin E.G.* Reducing the Level of Weakly Changing Noise by the Decorrelation Method during Ultrasonic Monitoring Using Antenna Arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 4. P. 310—317. [*Базулин Е.Г.* Уменьшение уровня слабо меняющихся помех методом декорреляции при проведении ультразвукового контроля с использованием антенных решеток // Дефектоскопия. 2020. № 4. С. 14—21.]

31. *Базулин Е.Г.* Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле для получения изображений рассеивателей с учетом эффекта перерассеивания в одномерном случае // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 1. С. 103—112.

32. *Базулин Е.Г., Гончарский А.В., Романов С.Ю., Сережников С.Ю.* Обратные задачи ультразвуковой томографии в неразрушающем контроле: математические методы и эксперимент // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 30—39.

33. *Базулин Е.Г.* Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 5—17.

34. ГОСТ 33844—2016. Композиты полимерные. Метод определения прочности на сжатие после повреждения многослойных углекомпозитов. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.

УДК 620.179.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В АНИЗОТРОПНОМ МАТЕРИАЛЕ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

© 2022 г. Н.П. Алешин[1], Н.А. Щипаков[1,*], М.Н. Дегтярев[1]

[1]*Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1*
[*]*E-mail: shchipak@bmstu.ru*

Поступила в редакцию 21.04.2022; после переработки 04.05.2022
Принята к публикации 06.05.2022

Рассмотрены возможные причины возникновения анизотропии акустических свойств в изделиях аддитивного производства. На основе акустических измерений определен тип упругой симметрии материала образца из сплава типа Inconel, изготовленного методом селективного лазерного сплавления (SLM). Анализ проведенных измерений показал, что направление выращивания образцов соответствует оси симметрии акустических свойств. Представлены результаты экспериментальных исследований и аналитического моделирования влияния анизотропии на амплитуду сигнала, отраженного от искусственного отражателя в виде бокового цилиндрического отверстия.

Ключевые слова: аддитивные технологии, ультразвуковой контроль, анизотропия акустических свойств, эхометод, селективное лазерное сплавление.

DOI: 10.31857/S0130308222060021; **EDN:** BMSXDI

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время аддитивные технологии находят все большее применение в промышленности. Однако вопрос контроля изделий аддитивного производства (АП) остается открытым ввиду наличия специфических дефектов и микроструктуры, характерной для аддитивно выращенных изделий. Микроструктура изделий АП оказывает непосредственное влияние на физические и механические свойства материала [1—3]. Известно, что материалы АП могут обладать достаточно выраженной анизотропией свойств, что является дополнительной трудностью для создания верифицированной методики контроля [4].

Одним из наиболее перспективных методов для неразрушающего контроля (НК) изделий АП является ультразвуковой контроль (УЗК). Значительное число исследователей изучает особенности применения этого метода для изделий АП [5—7]. Среди проблем применения УЗК авторы отмечают наличие анизотропии акустических свойств изделий, что затрудняет правильную идентификацию дефектов в зависимости от их локализации в изделии АП.

Причина анизотропии акустических свойств изделий аддитивного производства остается до конца неизученной и обуславливается различными факторами, такими как микроструктурные дефекты, остаточные напряжения, границы сплавления слоев, кристаллографические и морфологические текстуры.

Из-за послойного процесса формирования детали зерна при затвердевании приобретают вытянутую столбчатую форму, ориентированную вдоль направления выращивания [8]. При наращивании последующего слоя осуществляется неполный переплав предыдущего, приводящий к изменению направленности зерен, которые были расположены сверху и были направлены горизонтально (см. рис. 1) [9]. Неполный переплав предыдущего слоя является причиной того, что подавляющая часть зерен в детали имеют вытянутую параллельно направлению выращивания форму. Как было отмечено в [10], ориентация изделия по отношению к платформе построения влияет также на пористость формируемого изделия. В деталях, ориентированных горизонтально к направлению выращивания, пористость оказывается значительно выше, чем в деталях, ориентированных вертикально. Описанные выше особенности влияют на механические свойства изделий АП в различных направлениях.

Ориентация зерен в определенном направлении обуславливает структурную анизотропию среды. Известно, что существует связь между симметрией структуры и симметрией свойств, как правило, симметрия физических свойств оказывается на порядок выше, нежели симметрия структуры.

Для того, чтобы лучше понять основной фактор, влияющий на анизотропию акустических свойств, были изготовлены специальные образцы, полученные методом селективного лазерного плавления (SLM).

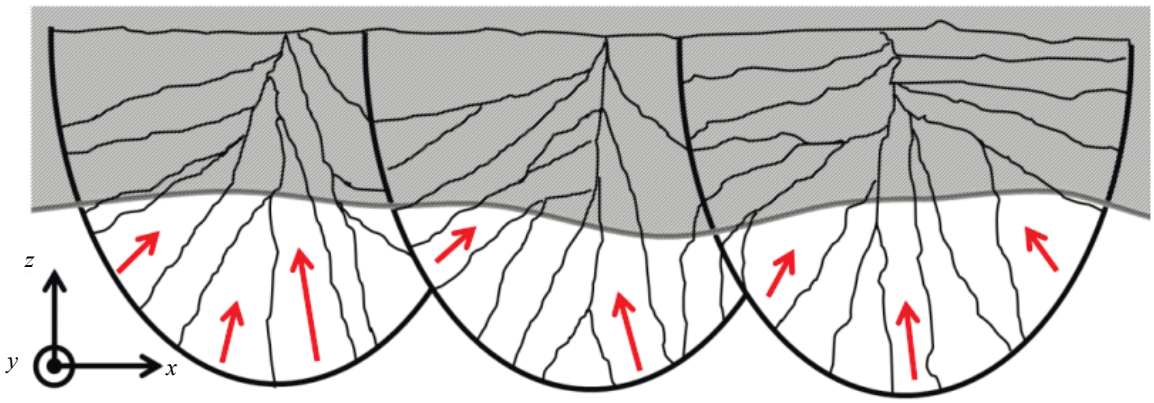

Рис. 1. Схема частичного переплава нижележащих слоев из [9]. Стрелки указывают приблизительную ориентацию кристаллографического направления внутри зерен.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В АНИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Общее уравнение акустической волны в анизотропной среде в матричной форме представлено в виде:

$$\nabla_{iK} C_{ijkl} \nabla_{Lj} \nu_j = \rho \frac{\partial^2 \nu_j}{\partial t^2}, \tag{1}$$

где ρ — плотность материала; ν_j — составляющая скорости частиц; ∇_{iK} — оператор дивергенции в матричной форме; ∇_{Lj} — оператор градиента в матричной форме;

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \tag{2}$$

— матрица коэффициентов жесткости; $i, j = 1, \ldots, 3$; $k, l = 1, \ldots, 6$.

В случае изотропных твердых тел направление поляризации акустической волны определяется полем смещения частиц. Когда направление поля смещения частиц параллельно вектору распространения волны, то волна называется продольной волной, в случае, когда перпендикулярно вектору распространения волны, то называется сдвиговой волной. В изотропных средах свойства распространения волн, такие как скорость и направление поляризации, не зависят от направления.

Для анизотропных сред направление поляризации трех волновых мод ориентировано не перпендикулярно и не параллельно вектору распространения волны. Движение частиц продольной волны в анизотропных средах происходит не только параллельно направлению распространения волны, но и перпендикулярно ему. Волна, характеризуемая таким поведением, носит название квазипродольной волны (qP).

Аналогичное поведение наблюдается и для сдвиговых волн в анизотропных средах, в связи с чем их называют квазипоперечными вертикальными (qSV) и квазипоперечными горизонтальными волнами (qSH).

В связи с наличием вышеуказанных эффектов в анизотропных материалах наблюдается анизотропия скорости распространения акустических колебаний в зависимости от направления ввода волны [11—14].

При распространении ультразвуковой волны в анизотропной среде возникает расхождение луча. Коэффициент, характеризующий степень расхождения луча (BD), определяется отношением углов изменения направления вектора фазовой скорости $\Delta\theta_g$ и вектора групповой скорости $\Delta\theta_p$:

$$BD = \left[\frac{\Delta\theta_g}{\Delta\theta_p}\right]. \tag{3}$$

В изотропной среде данное отношение всегда равно единице, так как энергия полностью сосредоточена вдоль направления волнового вектора.

В результате несовпадения векторов фазовой и групповой скорости в случае анизотропной среды происходит также отклонение ультразвукового луча (β) от прямолинейного распространения, определяемое из соотношения:

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{V}_p \cdot \mathbf{V}_g}{|\mathbf{V}_p| \cdot |\mathbf{V}_g|}\right), \tag{4}$$

где $\mathbf{V}_p$ и $\mathbf{V}_g$ — векторы фазовой и групповой скоростей соответственно.

Модуль отношения изменения фазовой скорости к величине изменения групповой скорости определяет коэффициент распространения поля излучателя (BS):

$$BS = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_p}, \tag{5}$$

где ΔV_g и ΔV_p — величины изменения фазовой и групповой скоростей соответственно.

Коэффициент распространения поля излучателя для материалов из изотропной ферритной стали равен нулю из-за того, что величина групповой скорости равна величине фазовой скорости. В случае анизотропных материалов коэффициент распространения поля изменяется ввиду изменения скоростей. Более высокий коэффициент распространения поля приводит к изменению распределения энергии вдоль акустической оси.

При УЗК анизотропных изделий необходимо учитывать влияние вышеуказанных эффектов. Отклонение и расхождение луча, неравномерное распределение скоростей в зависимости от направления ввода колебаний может приводить к различию амплитуды сигналов идентичных отражателей в зависимости от направления ввода колебаний, что в результате приведет к неправильной интерпретации результатов контроля.

На практике вычисление всех 21 элементов матрицы жесткости (2) является трудоемким и требует точного определения главных плоскостей. Если пренебречь различиями свойств по направлениям, перпендикулярным направлению выращивания, то среду можно рассматривать как трансверсально-изотропную. Ось, совпадающая с направлением выращивания материала, в таком случае будет являться осью симметрии бесконечного порядка, а все плоскости, перпендикулярные оси симметрии, будут являться плоскостями изотропии.

Для того, чтобы определить матрицу упругих коэффициентов трансверсально-изотропного материала, достаточно определить всего 5 независимых упругих постоянных: C_{33}, $C_{11}= C_{22}$, C_{66}, $C_{44}= C_{55}$, $C_{13}= C_{23}$, $C_{12}=C_{11}-2C_{66}$. Данные упругие коэффициенты можно определить экспериментальным путем за счет измерения скорости распространения ультразвуковой волны в различных направлениях [3]. Соотношения, связывающие скорости и коэффициенты жесткости, приведены в виде уравнений:

$$
\begin{gathered}
C_{11} = \rho \cdot V_{1/1}^2 ; \\
C_{22} = \rho \cdot V_{2/2}^2 ; \\
C_{33} = \rho \cdot V_{3/3}^2 ; \\
C_{44} = \rho \cdot V_{2/3}^2 ; \\
C_{55} = \rho \cdot V_{1/3}^2 ; \\
C_{66} = \rho \cdot V_{1/2}^2 ; \\
C_{23} = \sqrt{\left(C_{22} + C_{44} - 2\rho \cdot V_{23/23}^2\right) \cdot \left(C_{33} + C_{44} - 2\rho \cdot V_{23/23}^2\right)} - C_{44}; \\
C_{13} = \sqrt{\left(C_{11} + C_{55} - 2\rho \cdot V_{12/12}^2\right) \cdot \left(C_{33} + C_{55} - 2\rho \cdot V_{12/12}^2\right)} - C_{55},
\end{gathered}
\tag{5}
$$

где $V_{i/i}$ — скорость продольной волны в направлении i; $V_{i/j}$ — скорость поперечной волны, распространяющейся в направлении i с поляризацией в направлении j и $V_{ij/ij}$ — скорость квазипродольной или квазипоперечной волны, распространяющейся и поляризованной в плоскости ij.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Описание образцов для исследований

Образцы из Inconel 718 были получены методом SLM. Два образца были выполнены в виде цилиндров диаметром 30 мм и высотой 20 мм. По центру образцов были произведены механическим путем искусственные отражатели в виде бокового цилиндрического отверстия (БЦО) диаметром 3 мм. Эскизы образцов приведены на рис. 2*а*, *б*. Образцы были изготовлены с различной ориентацией по отношению к платформе построения.

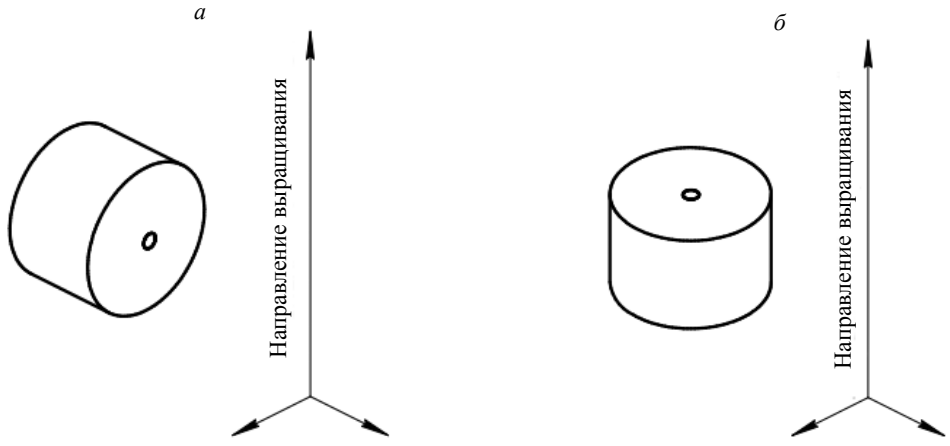

Рис. 2. Эскизы образцов с искусственными дефектами в виде БЦО:
а — образец № 1 (направление выращивания перпендикулярно оси цилиндрического образца); *б* — образец № 2 (направление выращивания совпадает с осью цилиндрического образца).

Для определения коэффициентов матрицы жесткости был подготовлен специальный образец (рис. 3), изготовленный при тех же режимах, что и вышеуказанные образцы. Габаритные размеры образца составляют 25×25×25 мм. Геометрия была спроектирована таким образом, чтобы обеспечить наличие 12 попарно параллельных граней для выполнения измерений скорости ультразвука в 6-ти направлениях. Этот образец аналогичен использованному в работе [3], где тот применялся для определения упругих констант Inconel 625.

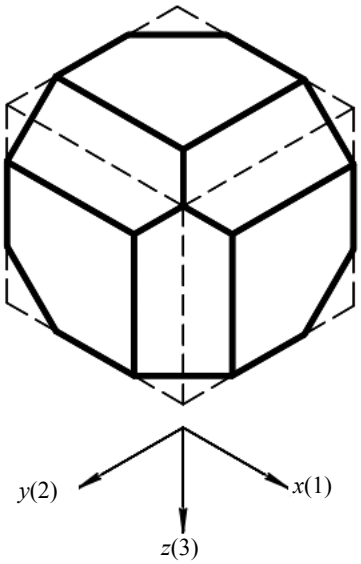

Рис. 3. Образец № 3 для определения упругих постоянных.

Аналитическое моделирование распространения и отражения ультразвуковых колебаний в трансверсально-изотропной среде

Чтобы количественно оценить возможное отклонение амплитуды принятого сигнала от искусственного дефекта, была использована модель распространения акустического поля, основанная на использовании метода аппроксимации Кирхгофа, метода разделения переменных (SOV) и теории геометрической дифракции (GTD model). При помощи вышеуказанных инструментов был имитирован иммерсионный УЗ контроль иммерсионным датчиком с частотой 5 МГц и диаметром пьезоэлемента 12,7 мм. Расстояние между датчиком и передней гранью образца составляет 95 мм. На рис. 4 представлена схема, использованная для моделирования ультразвуковых измерений.

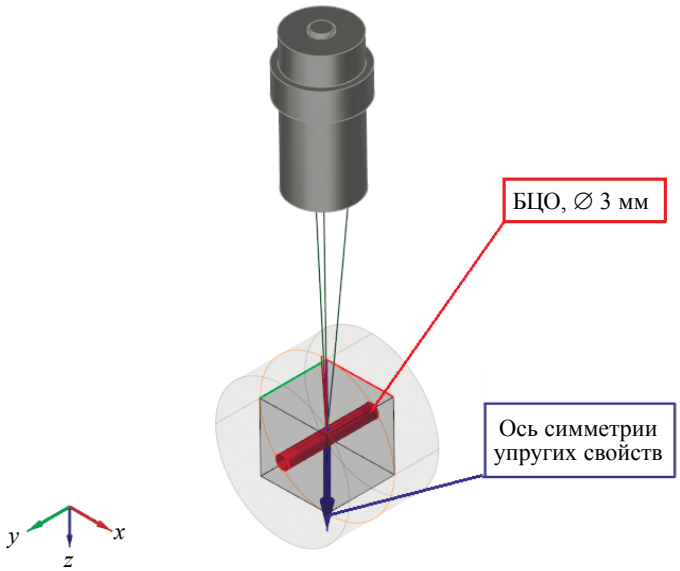

Рис. 4. Модель иммерсионного УЗ контроля цилиндрического образца с отражателем в виде БЦО.

Таблица 1

Значения коэффициентов матрицы жесткости для SLM-образца из отечественного жаропрочного никелевого сплава

$C_{11}= C_{22}$, ГПа	C_{33}, ГПа	$C_{44}= C_{55}$, ГПа	C_{66}, ГПа	C_{12}, ГПа	$C_{13}= C_{23}$, ГПа
268,5	259	86,5	72	124,5	125

Упругие свойства SLM-образца Inconel 718 были определены на образце № 3 (образец для определения упругих постоянных). Измерения скоростей для определения упругих свойств были проведены контактным способом при помощи датчиков продольных и поперечных волн с центральной частотой 5 МГц. Значения коэффициентов упругости (см. табл. 1) были использованы для моделирования свойств трансверсально-изотропного материала. Плотность материала составляет 8,2 г/см^3.

В результате моделирования были получены графики изменения исследуемых параметров (см. рис. 5). Скорость колебаний и амплитуда сигнала от БЦО меняются симметрично на участках от 0 до 90° и от 90 до 180° (положение 0° соответствует направлению ввода УЗ колебаний вдоль оси упругой симметрии, положение 90° — перпендикулярно оси упругой симметрии трансверсально-изотропного материала). Максимальное изменение скорости составило 4,7 %, что соответствует изменению на 256,3 м/с, а максимальное отклонение амплитуды — 2,7 дБ. В случае, когда направление ввода меняется в плоскости упругой симметрии, скорость и амплитуда сигнала от БЦО остаются неизменными.

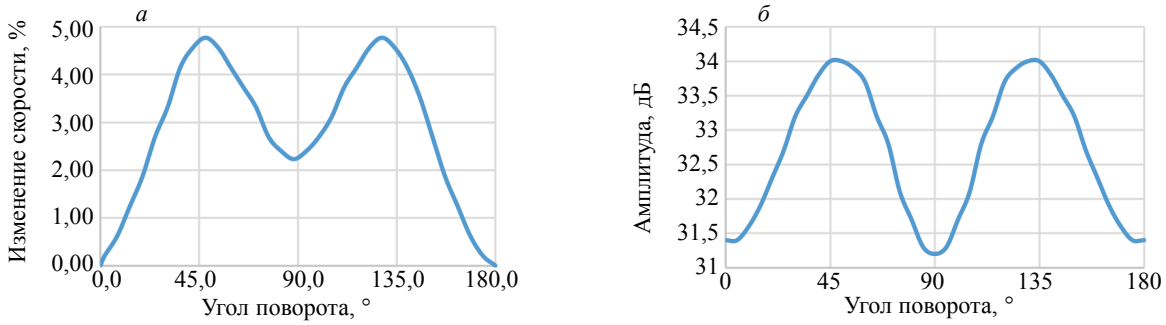

Рис. 5. Результаты моделирования:

а — зависимость изменения скорости от угла поворота относительно направления выращивания; *б* — зависимость амплитуды отраженного сигнала БЦО от угла поворота относительно направления выращивания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экпериментальные исследования по измерению амплитуды отраженного сигнала проводили иммерсионным способом при помощи иммерсионного нефокусированного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) продольных волн с центральной частотой 5 МГц. Ввод ультразвуковых колебаний осуществляли со стороны цилиндрической грани образца. Расстояние иммерсионного слоя было подобрано так, чтобы искусственный отражатель находился в дальней зоне формируемого акустического поля. Совмещенный датчик был установлен напротив образца так, чтобы акустическая ось была перпендикулярна собственной оси цилиндрического образца. Далее, образец, установленный на специальном поворотном столе, вращался по схеме рис. 6 на 180 °. Запись координаты осуществляли за счет применения энкодера «miniwheel», разрешение которого составляет 12 шагов на 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты измерений на образцах № 1 и 2 были получены в виде В-сканов, по которым были построены графические зависимости изменения скорости и амплитуды принятого сигнала от БЦО

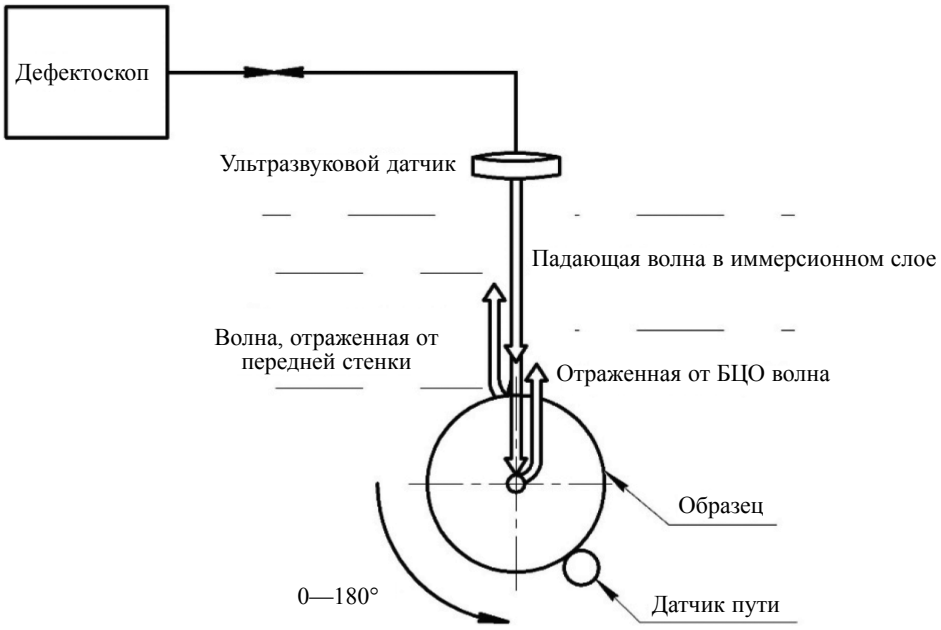

Рис. 6. Схема измерений изменения амплитуды сигнала от БЦО.

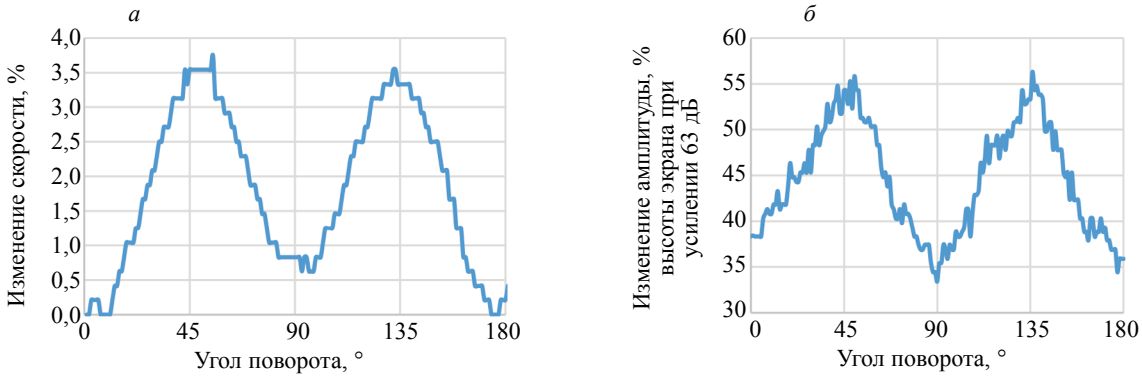

Рис. 7. Результаты экспериментов:

а — зависимость изменения скорости от угла поворота относительно направления выращивания; *б* — зависимость амплитуды отраженного сигнала БЦО от угла поворота относительно направления выращивания.

в зависимости от угла поворота. Анализ изменения измеряемых параметров на образце № 2 не выявил никакой закономерности. Напротив, на образце № 1 изменение скорости и амплитуды сигнала от БЦО показывает наличие определенной тенденции (рис. 7).

Как амплитуда, так и скорость распространения колебаний показывают идентичную тенденцию изменения при повороте образца на интервалах от 0 до 90° и от 90 до 180°. Угол поворота 0° соответствует вводу УЗ волн в образец вдоль направления выращивания, 90° — перпендикулярно направлению выращивания. При изменении направления ввода колебаний по отношению к направлению выращивания от 0 до 55°, а также от 93 до 133°, изменение скорости достигает своего локального максимального значения 3,7 %, что соответствует изменению скорости на 205,9 м/с. Аналогичным образом изменяется и амплитуда сигнала от БЦО. Максимальное отклонение амплитуды составило 22,9 %, что соответствует изменению на 4,5 дБ.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для количественного сравнения результатов эксперимента и моделирования было выполнено усреднение экспериментально определенной амплитуды путем наложения двух участков 0—90° и 90—180°. Результаты моделирования и экспериментальных измерений амплитуды сигнала от БЦО с учетом усреднения в каждой точке показаны на рис. 8. Для количественного сравнения изменения амплитуды при повороте относительно направления выращивания было проведено нормирование амплитуды принятого сигнала в каждой точке по значению амплитуды сигнала в точке 0°, что позволяет провести сравнение изменения амплитуды в дБ при повороте относительно направления выращивания до положения 90° — перпендикулярного направлению выращивания. Точками обозначены результаты измерения, сплошными кривыми — их аппроксимация.

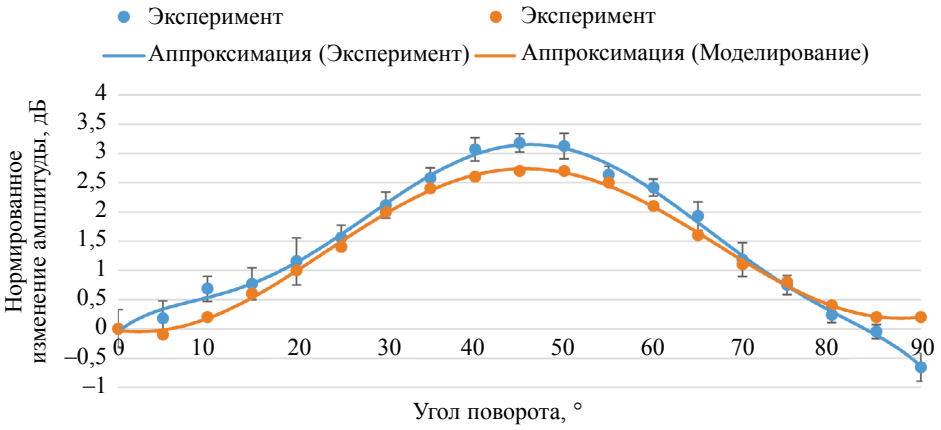

Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных и моделирования.

Между положениями 0—45° мы наблюдаем увеличение амплитуды на 3,2 дБ в случае эксперимента и увеличение до 2,7 дБ в случае моделирования. На участке от 45 до 90° изменение амплитуды снижается до –0,7 дБ в случае эксперимента и до 0,2 дБ в случае моделирования. Максимальное количественное различие между данными эксперимента и модели составляет 0,9 дБ, что говорит о хорошей сходимости результатов. Амплитуда сигнала при вводе УЗ колебаний перпендикулярно направлению выращивания (положение 0°) практически не отличается от амплитуды при возбуждении колебаний параллельно направлению выращивания (положение 90°), отклонение амплитуды между вышеуказанными положениями составляет менее 1 дБ.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что акустические свойства изделий АП могут отличаться в зависимости от направления распространения ультразвуковых колебаний в связи с особенностями формирования структуры изделий при послойном выращивании.

2. Предложенная аналитическая модель трансверсально-изотропной среды для оценки влияния акустической анизотропии изделий АП на амплитуду отраженных от модели дефекта ультразвуковых сигналов показала хорошее соответствие с экспериментом.

3. Максимальное отклонение амплитуды принятого сигнала от БЦО при изменении направления ввода на 45° от направления выращивания составило 3,2 дБ, что превышает допустимую погрешность измерений и предъявляет необходимость учитывать отклонение амплитуды при разработке технологии контроля изделий, изготовленных по аддитивным технологиям.

4. Определение симметрии упругих свойств позволяет количественно оценить влияние анизотропии на результаты контроля. Данная особенность обуславливает необходимость учета влияния свойств каждого конкретного изделия с определенной степенью анизотропии на достоверность результатов контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kim Felix H., Moylan Shawn P.* Literature Review of Metal Additive Manufacturing Defects // NIST Advanced Manufacturing Series 100-16. 2018.

2. *Алешин Н.П., Мурашов В.В., Щипаков Н.А., Краснов И.С., Ложкова Д.С.* Экспериментальные исследования возможностей и особенностей ультразвукового контроля деталей, изготовленных по аддитивных технологиям // Дефектоскопия. 2016. № 12. С. 17—24.

3. *Javidrad H.R., Salemi Sina*. Determination of elastic constants of additive manufactured Inconel 625 specimens using an ultrasonic technique // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020.

4. *Charmi A., Falkenberg R., Ávila L., Mohr G., Sommer K., Ulbricht A., Sprengel M., Neumann R. Saliwan, Skrotzki B., Evans A.* Mechanical anisotropy of additively manufactured stainless steel 316L: An experimental and numerical study // Materials Science and Engineering. 2021. V. 799.

5. *Honarvar F., Varvani-Farahani A.* A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control // Ultrasonics. 2020. V. 108. P. 106—127.

6. *Sol T., Hayun S., Noiman D., Tiferet E., Yeheskel O., Tevet O*. Nondestructive ultrasonic evaluation of additively manufactured AlSi10Mg samples // Additive Manufacturing. 2018. 22 (June). P. 700—707. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.016

7. *Hitzler L., Janousch C., Schanz J., Merkel M., Mack F., Öchsner A.* Non-destructive evaluation of AlSi10Mg prismatic samples generated by selective laser melting: Influence of manufacturing conditions // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2016. V. 47. No. 6. P. 564—581.

8. *Попович А.А., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Полозов И.А., Масайло Д.В., Григорьев А.В.* Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 3. С. 4—11. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-4-11

9. *Vrancken B., Thijs L., Kruth J.P., Van Humbeeck J.* Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting // Acta Mater. 2014. V. 68. P. 150—158.

10. *Wauthle R., Vrancken B., Beynaerts B., Jorissen K., Schrooten J., Kruth J. P., Van Humbeeck J.* Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures // Additive Manufacturing. 2015. V. 5. P. 77—84.

11. *Ринкевич А.Б., Смородинский Я.Г., Волкова Н.Н., Загребин Б.Н.* Групповая скорость ультразвука в трансверсально изотропной среде // Дефектоскопия. 1994. № 2. С. 58—63.

12. *Смородинский Я.Г.* Расчет поляризации упругих волн в трансверсально-изотропном аустените // Дефектоскопия. 1999. № 4.1. С. 9—12.

13. *Ринкевич А.Б., Смородинский Я.Г.* Упругие волны в неоднородной пластине аустенита в модели трансверсально-изотропной среды // Дефектоскопия. 2001. № 7. С. 40—64.

14. *Sanjeevareddy Kolkoori.* Quantitative Evaluation of Ultrasonic Wave Propagation in Inhomogeneous Anisotropic Austenitic Welds using 3D Ray Tracing Method / Numerical and Experimental Validation. Doctor's thesis. Berlin, 2014. 250 p.

УДК 620.179.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ СОСУДОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ЦКИ И ЭНТРОПИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2022 г. Цзян Пэн[1], Ли Кайруи[1,*], Чжан Люинь[1], Ли Вэй[1], Янь Сяовэй[1]

[1]*Северо-восточный нефтяной университет, 199 Фажан Роуд, Дацин 163318, Китай*
[*]*E-mail: xiguarui@foxmail.com*

Поступила в редакцию 12.01.2022; после доработки 11.03.2022
Принята к публикации 11.03.2022

Для изучения законов эволюции дефектов в баллонах, использующихся для хранения водорода под давлением, при различных условиях нагружения предлагается метод, совмещающий акустическую эмиссию (АЭ) и метод цифровых изображений. При формировании цифровых изображений вводится такой статистический параметр, как среднеквадратическое отклонение (СКО), и СКО при определении деформации на поверхности образца используется для определения параметров закона пластической эволюции материала в состоянии усталости. Более того, СКО объединяется с энтропией Шеннона, основанной на временной области АЭ, оба параметра определяются как для области внутри образца, так и на его поверхности. Результаты показывают, что с помощью метода анализа корреляции цифровых изображений с СКО в качестве ключевого параметра можно точно определить закон эволюции поверхностных напряжений в процессе хрупкого разрушения материала, а полученные результат лучше, чем при традиционном анализе скорости накопления.

Ключевые слова: 4130X, корреляция цифровых изображений, акустическая эмиссия, энтропия Шеннона, напряжение, стандартное отклонение.

DOI: 10.31857/S0130308222060033; **EDN:** BMTICS

1. ВВЕДЕНИЕ

В ответ на глобальное потепление и другие климатические проблемы, вызванные чрезмерными выбросами CO_2, глобальная энергетика переходит к экологически чистой энергетике. В этом контексте водородной энергии отдается предпочтение благодаря ее безуглеродным источникам энергии. В настоящее время водородная энергия широко используется в автомобилях на водородных топливных элементах и в других областях. Решение проблемы безопасного хранения и транспортировки водорода высокого давления является ключом к развитию водородной энергетики [1]. Сталь 4130X широко используется для изготовления стальных бесшовных баллонов большого объема для хранения водорода благодаря своей высокой прочности и низкой стоимости [2, 3]. Газовый баллон эксплуатируется в рабочей среде под давлением и без давления в течение длительного времени, что приводит к образованию и расширению усталостных трещин в баллоне и даже к утечке из корпуса баллона. Поэтому методы неразрушающего контроля используются для своевременного и эффективного мониторинга повреждения материала с целью предотвращения аварий в дальнейшем.

Среди методов неразрушающего контроля акустическая эмиссия (АЭ) обладает высокой чувствительностью к микроповреждениям и может точно отражать тенденцию эволюции микроповреждений в материалах, поэтому она широко применяется для мониторинга усталостных повреждений в различных материалах, таких как металлы, бетон и керамика [4—11]. АЭ не требует внешнего возбуждения, а анализируемые сигналы генерируются в процессе разрушения материала, поэтому важно реализовать эффективное извлечение параметров сигнала повреждения материала. Энтропия Шеннона была использована в области АЭ [12—17]. Chai и др. [18] обнаружили, что по сравнению с традиционными параметрами АЭ, энтропия АЭ не зависит от порога, установленного экспериментально и в большей степени основана на полноте исследования. Формы волн АЭ могут обеспечить точное и эффективное раннее обнаружение дефектов. Более того, зарождение трещин и их распространение имеют значительную корреляцию с энтропией Шеннона. Анализ повреждений, основанный на кумулятивной энтропии АЭ, может предсказать усталостное разрушение [19—21]. Hosseini и др. [22] использовали кумулятивную энтропию Шеннона и кумулятивную относительную энтропию Кульбака—Лейблера для прогнозирования зарождения трещин и также использовали отсчеты для вычисления энтропии; однако результаты зависели от порога и параметров характеристики сигнала (отсчетов).

Цифровая корреляция изображений (ЦКИ) — это технология оптических измерений, которая рассчитывает распределение деформации на объекте по изображениям объекта до и после дефор-

мации. Метод обладает такими преимуществами, как высокая точность, низкие требования к условиям проведения испытаний, простота эксплуатации и сильная помехоустойчивость, поэтому он широко используется для измерения деформации и изучения распространения трещин [23, 24]. Swain и др. [25] использовали АЭ для контроля дефектов в стали 15CDV6 и подтвердили результаты с помощью ЦКИ; характеристики АЭ и ЦКИ показали хорошую корреляцию, поэтому совместное применение АЭ и ЦКИ является более эффективным при анализе степени деградации материала и целостности структуры. Zhang и др. [26] использовали микроскопическое моделирование и статистический анализ для прогнозирования малоциклового усталостного ресурса. Результаты моделирования показали, что критическое значение СКО может диагностировать усталостное разрушение материала, а неравномерность деформации материала может свидетельствовать о повреждении.

На основании вышеупомянутых исследований в настоящей работе с помощью ЦКИ для определения параметров повреждения изделия было определено среднеквадратическое отклонение (СКО) поверхностной деформации образца, чтобы выяснить возможность использования степени неравномерности деформации для количественной оценки усталостного повреждения в стали 4130X. При исследовании образца стали 4130X при трехступенчатом циклическом силовом нагружении на основе полной формы волны АЭ были рассчитаны энтропия Шеннона и относительная энтропия Кульбака—Лейблера. Наконец, энтропия формы волны АЭ и СКО были скомбинированы для анализа механизма повреждения материала, чтобы определить параметры АЭ в процессе повреждения структуры стали в сосудах для хранения водорода под высоким давлением.

2. ПРИНЦИПЫ МЕТОДА

2.1. Определение параметров неравномерности деформации

При ЦКИ для фотографирования поверхностной деформации образца используется ПЗС-камера. Область расчета предварительно задается с помощью анализа деформации, определяется наиболее значимая точка между целевым изображением и опорным снимком и местоположение этой точки. Значение смещения точки получается из смещения координат на целевом и опорном изображениях, а изменение значения смещения применяют для характеристики изменения деформации поверхности. Измерительная система ЦКИ и принцип ее работы показаны на рис. 1.

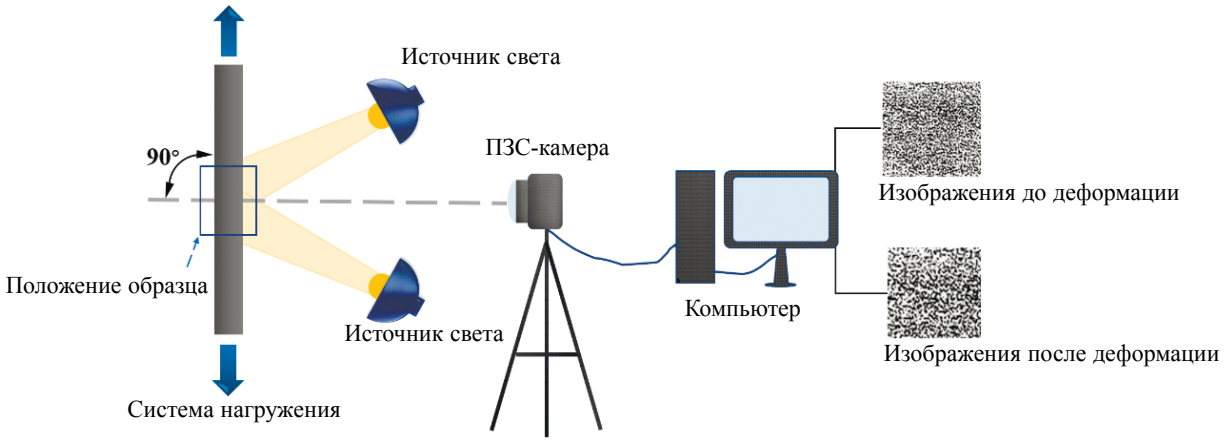

Рис. 1. Система сбора изображений для ЦКИ.

Образец подвергается непрерывному повреждению при нагружении, что в результате приводит к пластической деформации. Поскольку деформация образца неравномерна, для количественной оценки степени неравномерности деформации поверхности образца в данной работе определяли СКО напряжений. Характеристические параметры напряжения и повреждения, которые могут лучше отражать степень дисперсии данных о напряжениях на поверхности образца, выражаются как

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\varepsilon_i - \overline{\varepsilon}\right)^2}, \tag{1}$$

где ε_i — величина напряжения в i-ом пикселе; n — количество пикселей; $\overline{\varepsilon}$ — среднее значение напряжения каждого пикселя, определяемое как

$$\overline{\varepsilon} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i. \tag{2}$$

2.2. Расчет энтропии Шеннона и относительная энтропия

Полная форма сигнала АЭ получена из экспериментальных данных. Каждая волна сигнала содержит время и соответствующее значение электрического напряжения. Различные значения электрического напряжения для каждого сигнала делятся на блоки в статистической гистограмме в соответствии с энтропией Шеннона и относительной энтропией, рассчитанной с помощью уравнений:

$$H_S = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2\left(p_i\right), \tag{3}$$

$$H_R = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2\left(\frac{p_i}{p_{i+1}}\right), \tag{4}$$

где H_S — энтропия Шеннона; H_R — относительная энтропия Кульбака—Лейблера; n — общее количество интервалов, разделяемых по величине электрического напряжения преобразования сигнала АЭ; p_i — вероятность того, что величина электрического напряжения сигнала АЭ попадет в первый интервал.

Схема расчета энтропии Шеннона и относительной энтропии сигнала АЭ показана на рис. 2.

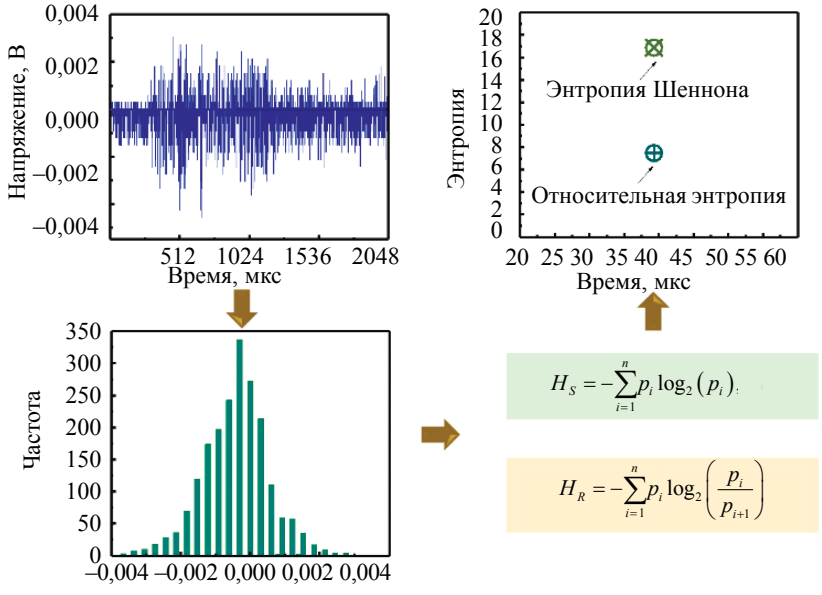

Рис. 2. Схема расчета энтропии Шеннона и относительной энтропии.

2.3. Тестовые образцы и их размеры

Сталь 4130X, которая широко используется в баллонах для хранения водорода, была выбрана в качестве материала для исследования в данной работе. Чтобы облегчить АЭ-контроль, образец был изготовлен в форме пластины. Сам образец и его конкретные размеры показаны на рис. 3.

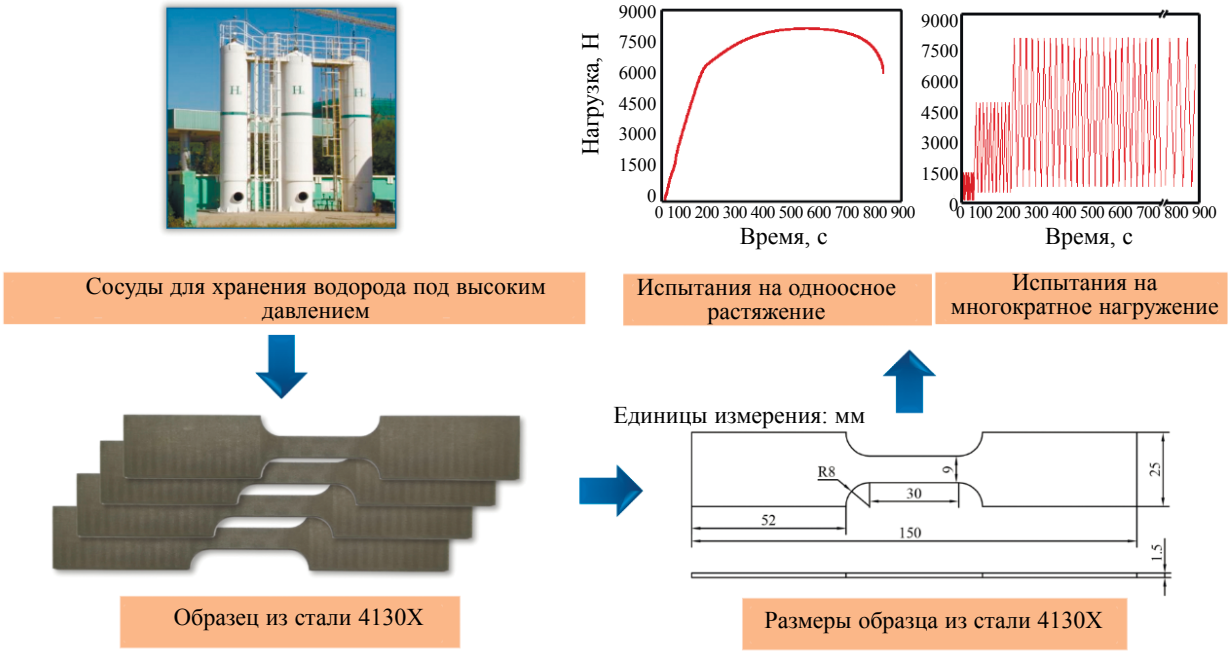

Рис. 3. Образцы из стали 4130X и их размеры.

2.4. Система и процесс контроля

Образцы были разделены на две группы в зависимости от режима нагружения: группа испытаний на разрушение при одноосном растяжении и группа испытаний на многократное нагружение. В каждую группу входило по четыре образца. Образцы из обеих групп были испытаны на универсальной испытательной машине Shimadzu AGS-X. У группы, подверженной разрушению при одноосном растяжении, при растяжении управляли скоростью растяжения, которая составляла 0,5 мм/мин. Принимая за основу результаты испытаний на одноосное растяжение, силы в 1500, 5000 и 8000 Н, соответствующие упругой фазе, фазе текучести и фазе упрочненного упрочнения образца соответственно, были выбраны в качестве трех уровней сил (1500 Н — 1 уровень, 5000 Н — 2 уровень, 8000 Н — 3 уровень) для испытания с контрольным циклом нагружения. Силы в 1500 и 5000 Н прикладывали в течение 10 циклов. Силу в 8000 Н применяли до тех пор, пока образец не разрушался и не ломался. Коэффициент циклического напряжения составлял $R = 0{,}1$. Весь процесс контролировался с помощью ЦКИ и АЭ.

Для АЭ-контроля использовалась система PCI-8 от PAC с порогом 30 дБ, коэффициентом усиления предусилителя — 40 дБ, временем определения пика — 300 с, временем определения всплеска — 600 с и временем записи всплеска — 1000 с, верхняя и нижняя границы диапазона аналогового фильтра равны 20 и 400 кГц соответственно, а частота дискретизации — 2000000 отсчетов в секунду. Два датчика Nano30 с частотным диапазоном 150—400 кГц располагали симметрично по центральной линии образца на расстоянии 60 мм друг от друга. Экспериментальная установка показана на рис. 4.

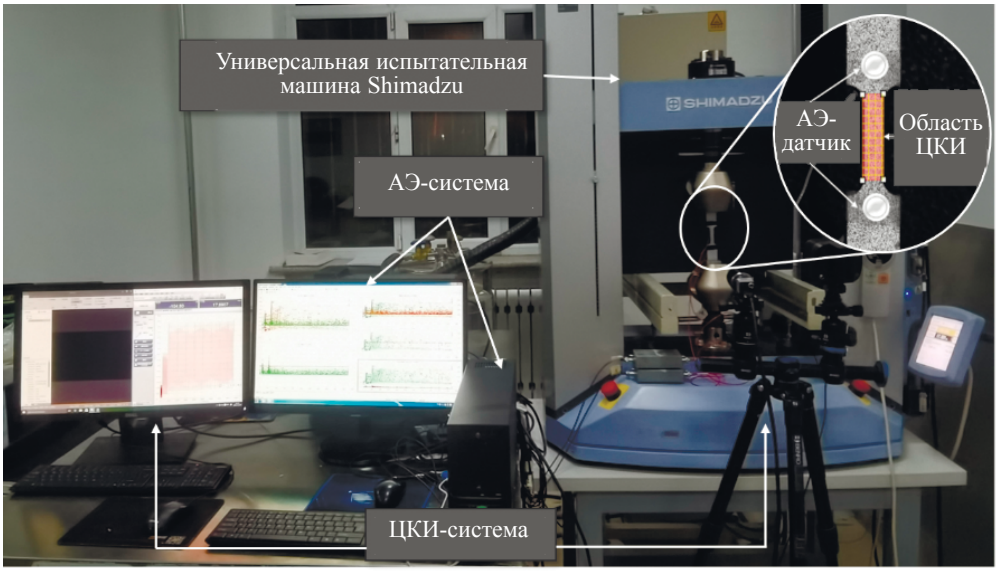

Рис. 4. Экспериментальная установка.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Анализ повреждений при растяжении стали 4130X, основанный на цифровой корреляции изображений

После обработки изображений, собранных с помощью ЦКИ-системы, был определен эволюционный процесс поверхностных напряжений образца стали 4130X в процессе растяжения (как показано на рис. 5). Испытуемый образец изучался в условиях одноосного растяжения и многократного нагружения. Поверхность испытуемого образца постепенно менялась от равномерно деформированной к неравномерно деформированной. Неравномерность деформации этой поверхности постепенно увеличивается до конкретного величины. По схеме можно предварительно определить критическую область повреждения образца.

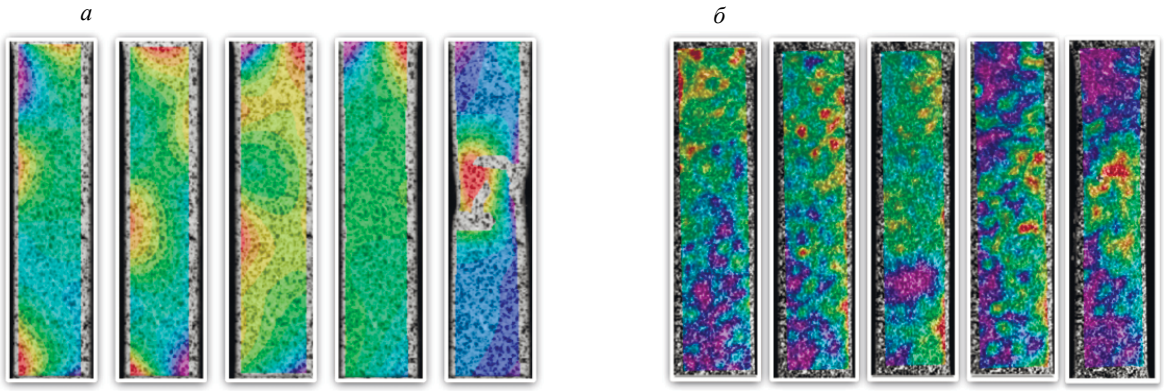

Рис. 5. Схема распределения поверхностных напряжений образца: образец при одноосном растяжении (*а*); многократное нагружение контролируемых участков (*б*).

На рис. 6 показаны кривые отклика максимальной деформации ε_{max}, минимальной деформации ε_{min} и средней деформации ε_{mean} на поверхности образца при испытании на разрушение при однонаправленном растяжении в нагрузке 3 уровня. Кривая отклика поверхностной деформации была разделена на четыре стадии в соответствии со скоростью роста и механической кривой: стадия

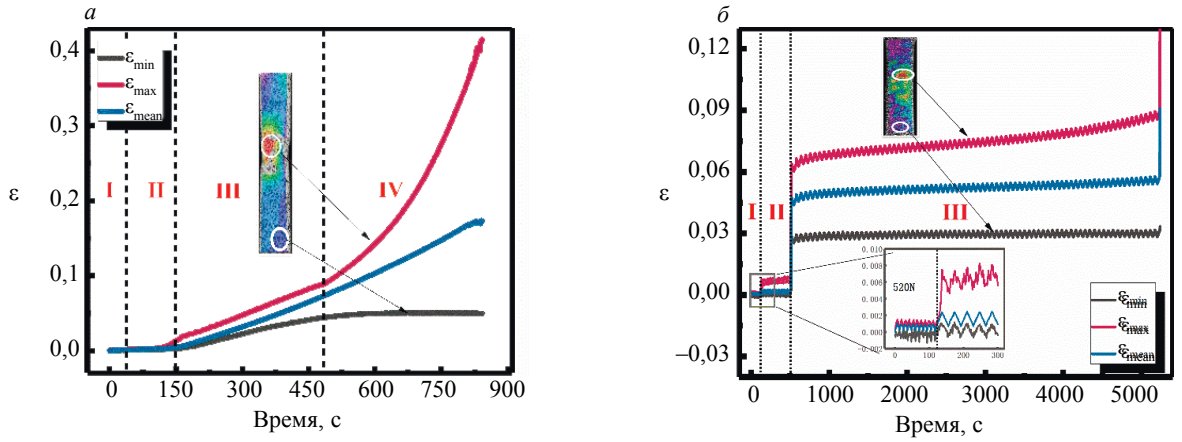

Рис. 6. Кривые отклика максимальной, минимальной и средней деформации на поверхности образца: образец при одноосном растяжении (*а*); многократное нагружение контролируемых участков (*б*).

упругости, стадия текучести, стадия упрочнения и стадия сужения. Более того, кривая отклика поверхностной деформации образца в условии многократного нагружения была разделена на три стадии (рис. 6*б*), соответствующие стадии цикла управления силой 3 уровня. На рис. 6*б* красная кривая соответствует точке, где напряжение на поверхности образца наибольшее (т.е. где напряжение сконцентрировано), а черная кривая соответствует точке, где напряжение на поверхности образца наименьшее. Максимальная деформация на поверхности образца увеличивалась с ростом нагрузки в разрывной машине из-за дефектов в микроструктуре образца. При дальнейшем увеличении нагрузки микроповреждения в образце продолжали накапливаться, что приводило к образованию микротрещин. Когда нагрузка достигала определенного значения, образец терял свою прочность и разрушался. При постоянном увеличении нагрузки и времени цикла степень неравномерности поверхностной деформации образца продолжала увеличиваться. В дальнейшем продолжится изучение закона эволюции неравномерной деформации на поверхности образца.

На рис. 7 показана кривая отклика СКО поверхностной деформации образца. Кривая отклика СКО поверхностной деформации образца при одноосном нагружении при растяжении до разрушения, показанная на рис. 7*а*, была условно разделена на три этапа в соответствии со скоростью роста кривой. На каждом этапе СКО увеличивался в одно и то же время (T = 10 с) в средней части каждого этапа. Результаты показали, что увеличение СКО на трех стадиях при T = 10 с составило 0,000012, 0,00036 и 0,0024, что свидетельствует об экспоненциальном увеличении СКО на трех стадиях. Повреждения продолжали накапливаться, а пластическая деформация продолжала накапливаться до разрушения образца.

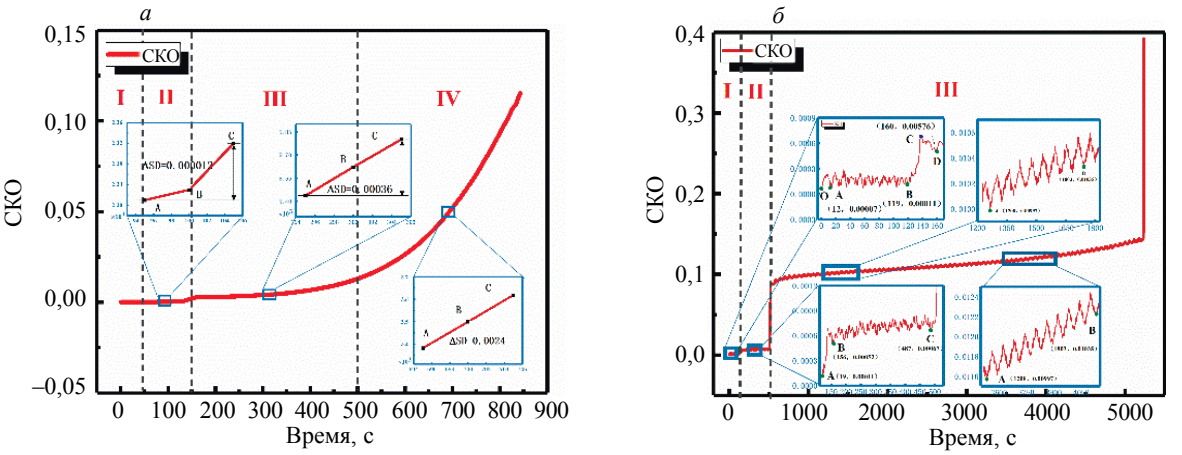

Рис. 7. Кривая отклика СКО поверхностной деформации образца: образец при одноосном растяжении (*а*); многократное нагружение контролируемых участков (*б*).

Кривая отклика поверхностной деформации СКО образца при повторном нагружении с трехуровневым контролем силы (рис. 7*б*) была разделена на три стадии в соответствии со скоростью роста кривой. Значение СКО наиболее быстро увеличивалось в начале каждого этапа, а циклическая силовая нагрузка колебалась; на первом и втором этапах было 10 циклов, а на третьем этапе значение СКО вначале постепенно увеличивалось и затем быстро, а время эволюции этого этапа было больше. Были рассчитаны первая стадия и первая половина третьего этапа, а также каждый из 10 циклов в средней области. Поскольку СКО периодически колеблется, для расчета скорости роста СКО была выбрана самая низкая точка каждого периода. Средние скорости роста СКО на первой и второй стадиях были рассчитаны и составили $0{,}37 \times 10^{-7}$ с$^{-1}$ и $0{,}64 \times 10^{-7}$ с$^{-1}$ соответственно. Средняя скорость роста СКО в первой и второй половинах третьей стадии были $0{,}45 \times 10^{-7}$ с$^{-1}$ и $0{,}11 \times 10^{-6}$ с$^{-1}$ соответственно. Кроме того, при увеличении силы общее СКО показывает тенденцию к увеличению, а скорость накопления повреждений увеличивается.

На рис. 8 показана микроструктура образца при разрушении при одноосном растяжении и многократном нагружении. Излом представляет собой типичное вязкое растрескивание, вызванное пластической деформацией, с многочисленными распределенными впадинами. По сравнению с образцами в условиях повторного нагружения, образцы, подверженные одноосному растяжению, имеют изломы с более крупными и глубокими впадинами, поскольку пластичность образцов при одноосном растяжении намного больше, чем у образцов в условиях повторного нагружения, то есть деформация образцов при одноосном растяжении намного больше, чем деформация образца при повторных нагружениях. Этот вывод совпадает с кривой СКО значений ЦКИ.

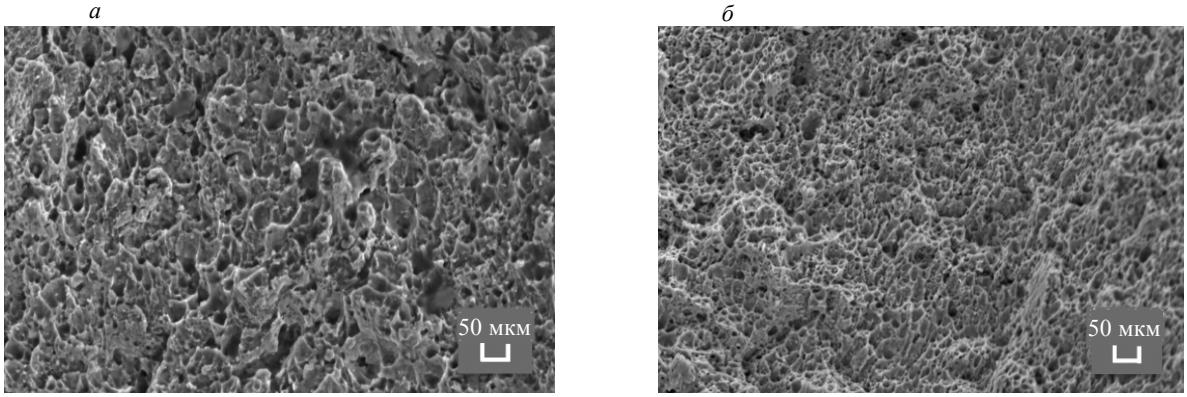

Рис. 8. Микроструктура поверхности излома образца: образец при одноосном растяжении (*а*); многократное нагружение контролируемых участков (*б*).

Таким образом, общее увеличение СКО образца, подверженного однонаправленному растяжению, намного больше, чем у образца, подверженного многократному нагружению. Кроме того, тип разрушения образца при однонаправленном растяжении представляет собой в основном пластическую деформацию, и пластичность в этом случае намного выше, чем у образца при многократном нагружении. Следовательно, кривую СКО можно использовать для разделения различных стадий повреждения независимо от того, подвергается ли образец однонаправленному растяжению или многократному нагружению. В результате метод анализа ЦКИ с использованием СКО в качестве параметра оценки может более точно характеризовать тенденцию к изменению разрушению материала.

3.2. Анализ разрушения стали 4130X, основанный на параметрах АЭ

Хотя значение СКО может быть использовано для определения закона эволюции неравномерной степени деформации на поверхности образца, значение СКО в основном контролируется путем наблюдения за поверхностью образца, и результаты, полученные для конкретного уровня силы, должны быть сопоставлены со значением, определенным внутри образца. Поэтому метод АЭ применяли в эксперименте на образце для осуществления динамического мониторинга и определения параметров разрушения при растяжении. Как видно на рис. 9*а*, в образце для испытания на одноосное растяжение в упругой стадии появилось небольшое количество низкоамплитудного

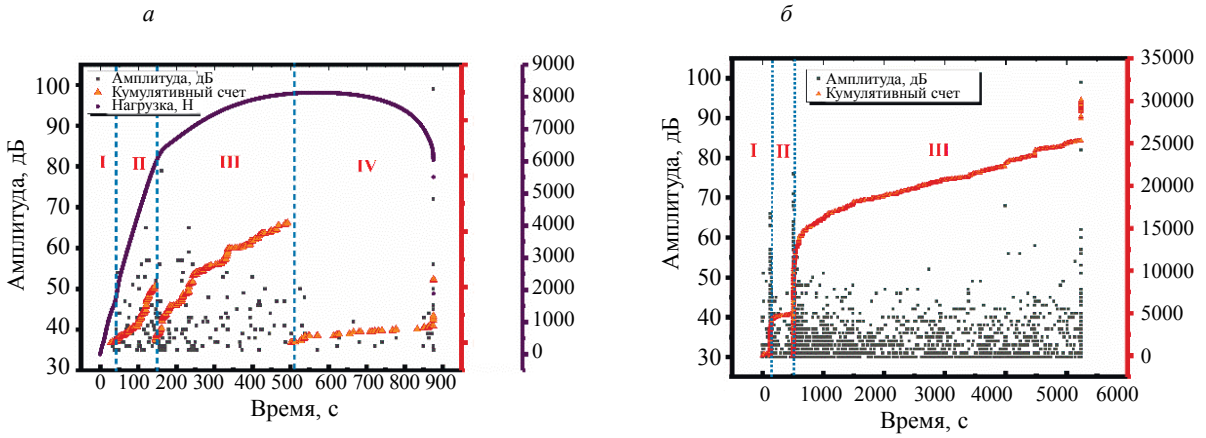

Рис. 9. Диаграмма параметров акустической эмиссии: образец при одноосном растяжении (*а*); многократное нагружение контролируемых участков (*б*).

сигнала, в основном сконцентрированного на уровне 30—40 дБ. Это объясняется главным образом малым количеством дефектов в образце и присутствием небольшого количества сигналов от дефектов в процессе растяжения, что приводит к равномерной деформации. На стадии пластической деформации генерировалось множество сигналов АЭ, амплитуда которых в основном была сосредоточена на уровне 40—50 дБ. На этой стадии, по мере увеличения нагрузки, внутренние дислокации образца постепенно увеличивались, и в образце начали происходить пластические деформации, что привело к медленному увеличению значения суммарной неоднородной деформации. На стадии упрочнения интенсивная пластическая деформация вызвала более быстрой рост величины неравномерной деформации, материал начал упрочняться, степень свободы дислокаций уменьшилась, подвижность уменьшилась, интенсивность сигнала АЭ постепенно уменьшалась, а амплитуда в основном была сосредоточена на уровне 50—60 дБ. Распространение трещины было сосредоточено в основном при 55—65 дБ, а тренд кумулятивного счета на каждом этапе был приблизительно линейным, подобно тренду СКО.

Амплитуда и кумулятивный счет для образца при многократном нагружении быстро увеличивались в начале каждого этапа (рис. 9*б*). Это связано с приложением осевого растягивающего напряжения, быстрым накоплением неравномерной деформации и увеличением внутреннего повреждения. По сравнению с образцом, поверженному одноосному растяжению, мощность сигнала распространения трещины увеличилась, в основном на 55—70 дБ. Кроме того, кумулятивный счет демонстрировал медленный рост в сравнении и приблизительно соответствовал тренду значения СКО.

3.3. Анализ разрушения стали 4130X при использовании информационной энтропии

Поскольку традиционный метод анализа АЭ во временной области может быть использован только для качественного анализа, визуальный контроль состояния повреждения с помощью одного параметра невозможен. На рис. 10 показана эволюция кумулятивной энтропии АЭ, кумулятивного счета и кумулятивной энергии образцов, полученных при одноосном растяжении и многократном нагружении, а также график сравнения СКО. Счет — это количество раз, когда сигнала превышает порог. Энергия отражает площадь под огибающей сигнала. Кумулятивный счет и кумулятивная энергия использовались для количественной оценки повреждения материала. Кумулятивная энтропия, кумулятивный счет и кумулятивная энергия образца при однонаправленном растяжении показали аналогичные тенденции развития. Повреждение материала можно разделить на четыре стадии на основе кумулятивной энтропии, что соответствует стадии деления СКО, и эти две стадии коррелируют друг с другом.

Для образцов, подвергавшихся повторному нагружению, кумулятивная энтропия Шеннона, кумулятивный счет и кумулятивная энергия также демонстрировали аналогичные тенденции эволюции. Кривая кумулятивной энтропии и СКО может быть четко разделена на три стадии в соответствии с тенденцией эволюции. Поэтому испытание на повторное нагружение стали 4130X может быть использовано для количественной оценки кумулятивной энтропии. Резкое увеличение

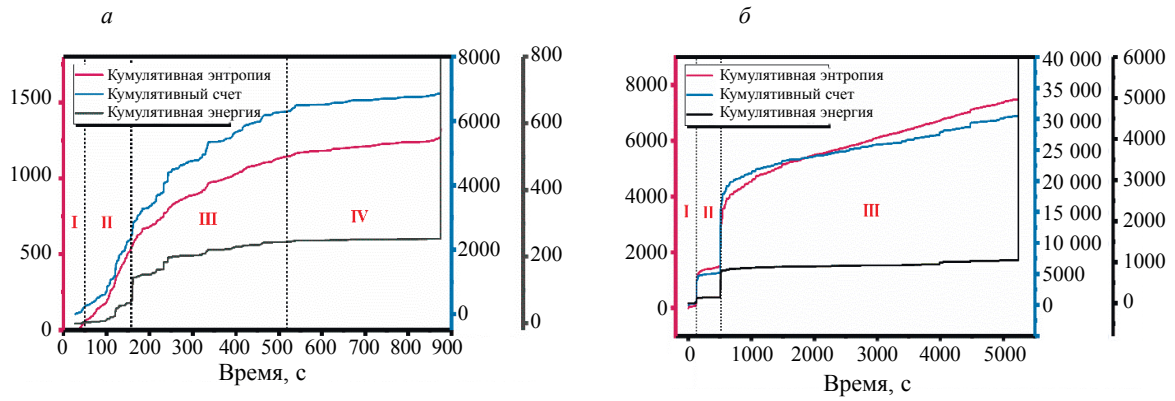

Рис. 10. Эволюция кумулятивной энтропии, кумулятивного счета, энергии и СКО образцов: образец при одноосном растяжении (*а*); многократное нагружение контролируемых участков (*б*).

было отмечено в первом цикле каждой стадии цикла, а кумулятивная энтропия Шеннона была приблизительно линейной на третьей стадии. По сравнению с кривой СКО, которая показала более высокую чувствительность, кривая значений СКО показала лучшую периодичность.

На рис. 11 показана эволюция кумулятивной энтропии Шеннона и кумулятивной относительной энтропии при разрушении образца при одноосном растяжении и многократном нагружении. Кумулятивная энтропия Шеннона и кумулятивная относительная энтропия для двух методов нагружения показывают схожие тенденции. Для образца, подвергнутого одноосному растяжению, процесс разрушения можно разделить на четыре стадии. По сравнению с кумулятивной относительной энтропией, кумулятивная энтропия Шеннона оказалась более чувствительным к повреждениям параметром.

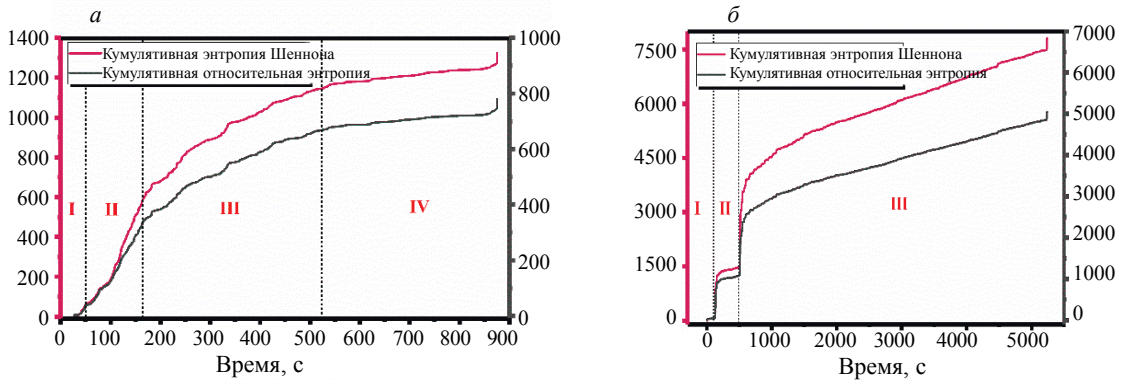

Рис. 11. Зависимости изменения кумулятивной энтропии Шеннона и кумулятивной относительной энтропии образца от времени: образец при одноосном растяжении (*а*); многократное нагружение контролируемых участков (*б*).

Для дальнейшего изучения наклона кривой кумулятивной энтропии Шеннона и кумулятивной относительной энтропии и кривой эволюции СКО для расчета был выбран один и тот же временной интервал для испытуемых образцов при одноосном растяжении и многократном нагружении для каждого периода цикла. На первом и втором этапах неравномерная деформация материала была меньше, а энтропия быстро возрастала. В начале третьей стадии неравномерная деформация постепенно увеличивалась, а энтропия уменьшалась; наклон кривой разрушения был близок к 0. Для образца при многократном нагружении кривую изменения энтропии можно четко разделить на три стадии, и в начале каждой стадии скорость увеличения неравномерной деформации внутри материала была медленной, а скорость увеличения энтропии — высокой; после неравномерная деформация увеличивалась. Скорость постепенно увеличивалась, скорость роста энтропии постепенно уменьшалась, и наклон кривой энтропии постепенно уменьшался. В образце при повторном нагружении общая пластическая деформация была меньше, чем в процессе одноосного растяжения, а наклон кривой энтропии был больше, чем в случае образца с одноосным растяжением.

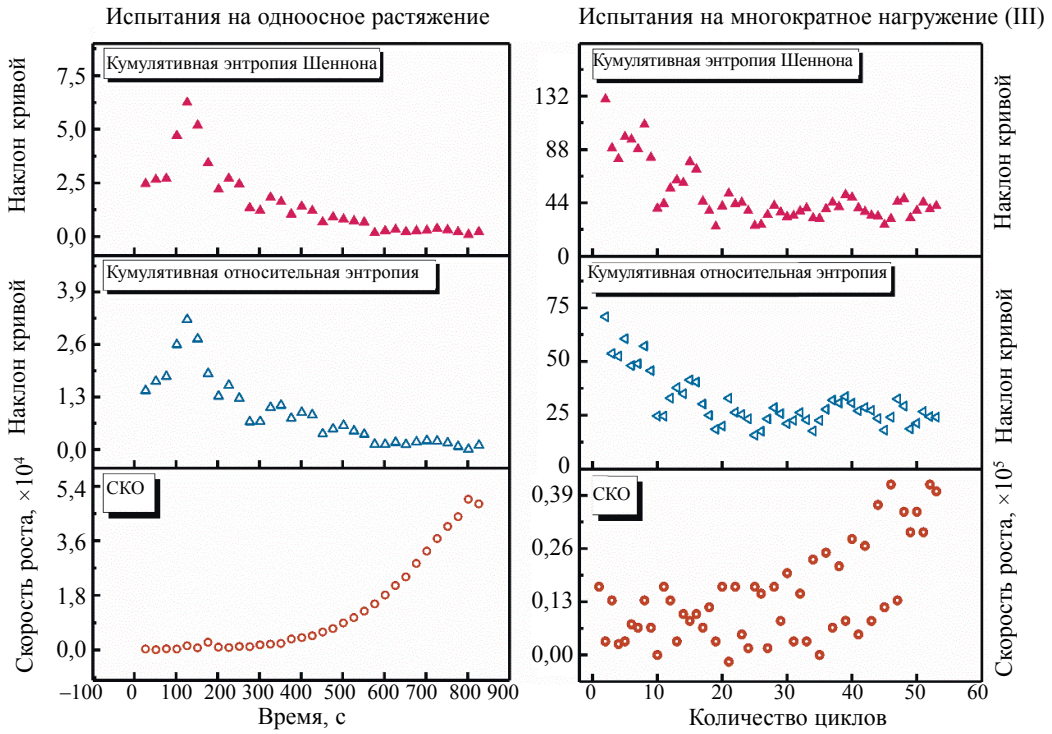

Рис. 12. Сравнение наклона кривой кумулятивной энтропии Шеннона, наклона кривой кумулятивной относительной энтропии и скорости роста кривой СКО для образца, подверженного одноосному растяжению и многократному нагружению (стадия III).

В общем, наклон кривой энтропии связан со скоростью роста кумулятивной СКО неравномерной деформации материала. Если кумулятивная скорость роста СКО неравномерной деформации больше, то наклон кривой энтропии будет меньше, т.е. если скорость роста энтропии медленнее, то образец близок к разрушению. Более того, значение СКО показывает чувствительность на стадии упрочнения в случае одноосного растяжения образцов, и наблюдается значительный всплеск.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проведены АЭ-контроль и контроль с применением ЦКИ на образцах стали 4130X, подверженных одноосному растяжению и многократному нагружению, и были получены следующие выводы:

1. Экспериментальные результаты показывают, что как методика АЭ-контроля для поиска внутренних повреждений материала, так и методика ЦКИ для контроля внешней поверхностной деформации материала являются надежными и могут эффективно устанавливать законы усталостного разрушения в стали 4130X.

2. Наклон кривой энтропии связан с кумулятивной скоростью роста неравномерной деформации (величина СКО) материала. Чем выше кумулятивная скорость роста величины СКО, тем меньше наклон кривой энтропии, т.е. чем ниже скорость роста величины энтропии, тем ближе образец к разрушению. Поскольку степень пластической деформации образца, подверженного одноосному растяжению, много больше, чем степень пластической деформации образца, подверженного многократному нагружению, скорость роста величины полного СКО выше, чем скорость роста величины полного СКО у образца, подверженного многократному нагружению. Следовательно, наклон кривой энтропии в состоянии, близкому разрушению образца, подверженного одноосному растяжению, много меньше (близок к 0), чем наклон кривой энтропии образца, подверженного многократному нагружению. Таким образом, совместное использование величин СКО и энтропии АЭ может лучше обнаруживать и оценивать развитие повреждений при растяжении в стали 4130X.

Авторы заявляют о том, что у них нет конфликта интересов и личной заинтересованности, которые могли бы повлиять на исследование, представленное в данной статье.

Работа выполнена в рамках проекта Фонда постдоковских исследований провинции Хэйлунцзян LBH-Q21083.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hua Z., Zhang X., Zheng J., Gu C., Cui T., Zhao Y.* et al. Hydrogen-enhanced fatigue life analysis of Cr–Mo steel high-pressure vessels // Int. J. Hydrogen. Energy. 2017. V. 42. P. 12005—14.

2. *Tsuda K., Kimura S., Takaki T., Toyofuku Y., Adaniya K., Shinto K.* et al. Design proposal for hydrogen refueling infrastructure deployment in the Northeastern United States // Int. J. Hydrogen. Energy. 2014. V. 39. P. e7459.

3. *Alazemi J., Andrews J.* Automotive hydrogen fuelling stations: An international review // Renew. Sust. Energy Rev. 2015. V. 48. P. 483—99.

4. *Seleznev M., Weidner A., Biermann H., Vinogradov A.* Novel method for in situ damage monitoring during ultrasonic fatigue testing by the advanced acoustic emission technique // Int. J. Fatigue. 2021. V. 142. P. 105918.

5. *Wadley H., Mehrabian R.* Acoustic emission for materials processing: a review // Mater. Sci. Eng. 1984. V. 65. P. 245—63.

6. *Song Z., Frühwirt T., Konietzky H.* Fatigue characteristics of concrete subjected to indirect cyclic tensile loading: insights from deformation behavior, acoustic emissions and ultrasonic wave propagation // Construct. Build. Mater. 2021. V. 302. P. 124386.

7. *Zhou Y., Lin L., Wang D., He M., He D.* A new method to classify railway vehicle axle fatigue crack AE signal // Appl Acoust. 2018. V. 131. P. 174—85.

8. *Dong X., Yang G., Liu S.* Experimental study on AE response and damage evolution characteristics of frozen sandstone under uniaxial compression // Cold Regions Sci. Technol. 2022. V. 193. P. 103424.

9. *Grosse C.U., Ohtsu M.* Acoustic emission testing: Springer Science & Business Media, 2008.

10. *Sakaki S., Horibe S., Yoshida M.* Effect of stacking fault energy on pulsating fatigue behavior for fcc metals under the fully repeated loading // Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Misrostructure and Processing. 2014.

11. *Adibi H., Ashtiani A.S., Rahimi A.* In-Process Monitoring of Nickel-Based Super Alloy Grinding Using the Acoustic Emission Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 909—917.

12. *Hao Q., Zhang X., Wang Y., Shen Y., Makis V.* A novel rail defect detection method based on undecimated lifting wavelet packet transform and Shannon entropy-improved adaptive line enhancer // J. Sound. Vib. 2018. V. 425. P. 208—20.

13. *He K., Xia Z., Si Y., Liang J., Yong J., Shi W.* Detection of arc characteristics and weld forming quality of aluminum alloy DP-MIG welding using AE signal through resonance demodulation // Measurement. 2021. P. 110427.

14. *Sun F., Xiao B., Zhang Y.* Quantitative damage evaluation of LY225 steel under monotonic tensile loading based on acoustic emission entropy // J. Construct. Steel. Res. 2021. V. 185. P. 106860.

15. *Karimian S.F., Modarres M.* Acoustic emission signal clustering in CFRP laminates using a new feature set based on waveform analysis and information entropy analysis // Compos Struct. 2021. V. 268. P. 113987.

16. *Sauerbrunn C.M., Kahirdeh A., Yun H., Modarres M.* Damage assessment using information entropy of individual acoustic emission waveforms during cyclic fatigue loading // Appl. Sci. 2017. V. 7. P. 562.

17. *Kahirdeh A., Yun H., Modarres M.* Degradation entropy: an acoustic emission based approach to structural health assessment / In: Structural Health Monitoring. 2017. P. 2213—9.

18. *Chai M., Zhang Z., Duan Q.* A new qualitative acoustic emission parameter based on Shannon's entropy for damage monitoring // Mech. Syst. Signal. Proces. 2018. V. 100. P. 617—29.

19. *D'Angela D., Ercolino M.* Acoustic Emission Entropy as a fracture-sensitive feature for real-time assessment of metal plates under fatigue loading // Procedia. Struct. Integr. 2019. V. 18. P. 570—6.

20. *Karimian S.F., Modarres M., Bruck H.A.* A new method for detecting fatigue crack initiation in aluminum alloy using acoustic emission waveform information entropy // Eng. Fract. Mech. 2020. V. 223. P. 106771. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106771

21. *Chai M., Zhang Z., Duan Q., Song Y.* Assessment of fatigue crack growth in 316LN stainless steel based on acoustic emission entropy // Int. J. Fatigue. 2018. V. 109. P.145—56.

22. *Hosseini S.M., Ghasemi-Ghalebahman A., Azadi M., Jafari S.M.* Crack initiation detection in crankshaft ductile cast iron based on information entropy of acoustic emission signals under tensile loading // Eng. Fail. Anal. 2021. P. 105547. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105547

23. *Zeng L., Wang L., Hua P., He Z., Zhang G.* In-situ investigation of dwell fatigue damage mechanism of pure Ti using digital image correlation technique // Mater Charact. 2021. V. 181. P. 111466. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111466

24. *Baktheer A., Becks H.* Fracture mechanics based interpretation of the load sequence effect in the flexural fatigue behavior of concrete using digital image correlation // Construct. Build. Mater. 2021. V. 307. P. 124817. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124817

25. *Swain D., Binu B., Purushothaman K., Rao G., Thomas B.P., Kurian T.* et al. Use of full-field measurements for understanding acoustic emission (AE) signals from 15CDV6 ESR steel specimens // Procedia Struct. Integr. 2019. V. 14. P. 207—14.

26. *Zhang K.S., Shi Y.K., Ju J.W.* Grain-level statistical plasticity analysis on strain cycle fatigue of a FCC metal // Mech. Mater. 2013. V. 64. P. 76—90. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.05.001

УДК 620.179.152.1: 519.612.4

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ МАЛОРАКУРСНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В РФЯЦ—ВНИИТФ: ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2022 г. А.Б. Коновалов[1,*], В.В. Власов[1,], А.Н. Киселев[1,***]**

[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр — ВНИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина» (РФЯЦ—ВНИИТФ), Россия 456770 Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, 13
*E-mail: * a_konov@mail.vega-int.ru; ** vitaly.vlasov.v@yandex.ru; *** a.n.kiselev@vniitf.ru*

Поступила в редакцию 10.04.2022; после доработки 22.04.2022
Принята к публикации 22.04.2022

В последние 20 лет в РФЯЦ—ВНИИТФ разрабатывается рентгенографический комплекс на основе линейного индукционного ускорителя электронов с возможностью реконструкции внутренней 3D-структуры газодинамических объектов. Наряду с задачей создания уникального источника рентгеновского излучения важнейшей является также задача разработки таких алгоритмов реконструкции, которые позволили бы точно восстанавливать томограммы объектов по минимально возможному числу ракурсов съемки. Настоящая статья представляет краткий исторический очерк развития алгоритмической базы малоракурсной компьютерной томографии (МРКТ) в РФЯЦ—ВНИИТФ, основу которой составляют алгебраические алгоритмы реконструкции (algebraic reconstruction techniques, ART) и их модификации. Дано краткое описание наиболее эффективных из разработанных модификаций ART и приведены примеры реконструкции моделей газодинамических объектов с их использованием. В заключении обозначены дальнейшие направления развития алгоритмической базы МРКТ быстропротекающих газодинамических процессов.

Ключевые слова: малоракурсная компьютерная томография (МРКТ) быстропротекающих процессов, алгебраические алгоритмы реконструкции (ART), модели газодинамических объектов (ГДО), полосовые артефакты, априорная информация, регуляризация, опознавание со сжатием (CS), глубокое обучение (DL).

DOI: 10.31857/S0130308222060045; **EDN:** BMYYWL

ВВЕДЕНИЕ

Задача совершенствования методов исследования быстропротекающих взрывных процессов уже на протяжении нескольких десятилетий вызывает неослабевающий интерес исследователей. Ее актуальность возросла после запрещения полномасштабных взрывных экспериментов с делящими веществами. В этих условиях на первый план выступает численный эксперимент, в рамках которого 3D-движение и энерговыделение газодинамического объекта (ГДО) моделируется на компьютере. К сожалению, современные компьютерные программы не способны точно описать движение ГДО, поскольку используемые для численных расчетов уравнения состояния вещества носят приближенный характер. Один из выходов из создавшейся ситуации заключается в том, что часть информации, например, о пространственном распределении параметров ГДО, может быть получена из взрывного радиографического эксперимента с инертной центральной частью объекта. Далее компьютерное моделирование объекта с активной центральной частью может быть продолжено с использованием уже полученной информации.

В течение многих лет «золотым стандартом» при радиографических исследованиях внутренней структуры ГДО являлся метод импульсной рентгенографии [1]. Этот метод и сегодня позволяет решать целый ряд экспериментальных задач. Однако импульсные бетатроны и регистраторы на основе фотопленки, традиционно использовавшиеся до последнего времени в качестве соответственно источников и приемников излучения, уже не удовлетворяют требованиям современности. Поэтому перспективы дальнейшего развития метода рентгенографии, безусловно, связываются с разработкой и оснащением рентгенографических комплексов современными генераторами электронного пучка и современными цифровыми системами регистрации. Но не только с этим. Известно, что основным недостатком радиографического метода является наложение структур на регистрируемом теневом изображении, когда 3D-объект проецируется на плоскость системы регистрации. На таком изображении теряется информация о 3D-свойствах объекта, и пространственные структуры вдоль направления распространения лучей не разрешаются. Решить проблему наложения структур позволяет метод 3D-компьютерной томографии [2], который заключается в компьютерной обработке с применением специальных алгоритмов 2D-теневых изображений, зарегистрированных для различных ракурсов съемки. Поэтому край-

не желательно, чтобы современные рентгенографические комплексы обеспечивали возможность томографической реконструкции 3D-структуры ГДО. В настоящее время подобные комплексы разрабатываются в США [3, 4], Великобритании [5], Франции [6] и Китае [7]. На протяжении последних 20 лет ведется такая разработка и в РФЯЦ—ВНИИТФ. О ее значимых успехах свидетельствует завершение разработки источника — линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20 [8—14] и сдача первой очереди комплекса импульсной томографии [15].

Наличие в комплексе громоздкого и дорогостоящего линейного индукционного ускорителя связано с необходимостью обеспечить требуемую просвечивающую способность для ГДО с большим атомным номером. Уникальные характеристики ЛИУ-20 позволяют сделать разводку пучка электронов на несколько мишеней и получить, таким образом, несколько ракурсов съемки для реализации метода томографии. Однако число таких ракурсов не может превышать 5—10. И это является главным ограничением томографии быстропротекающих процессов. Можно отметить несколько этапов, которые характеризуют исторический путь решения задачи сокращения числа ракурсов, т.е. путь развития малоракурсной компьютерной томографии (МРКТ). Первый связан с разработкой базовых алгоритмов, основанных на разложении в ряд, т. е. собственно алгебраических алгоритмов реконструкции (algebraic reconstruction techniques, ART) [16—18]. Второй этап — это их усовершенствование и разработка итерационных алгоритмов, основанных на использовании моделей [19—23]. Предпосылкой третьего этапа послужило создание в середине двухтысячных годов теории опознавания со сжатием (compressed sensing, CS) [24, 25]. Сегодня на ее основе уже созданы практические алгоритмы [26—30], которые позволяют точно восстанавливать изображение по 15—20 ракурсам и даже меньше. Наконец, бурное развитие компьютерных технологий вывело на новый уровень потенциального использования метод глубокого обучения (deep learning, DL). Сегодня уже доказана эффективность его применения в томографии с точки зрения дальнейшего сокращения числа ракурсов съемки, по которым еще возможна точная реконструкция (см., например, [31, 32]).

Разумеется, разработчики алгоритмов реконструкции для МРКТ в РФЯЦ—ВНИИТФ не стали исключением и прошли тот же путь, что и другие исследователи: от базовых ART до основанных на CS- и DL-алгоритмов. Однако специфика МРКТ быстропротекающих процессов без сомнения наложила на этот путь свой отпечаток. Мы надеемся, что те оригинальные модификации ART, которые нам удалось разработать и которые мы представляем в настоящей статье, вызовут живой интерес у читателя. В разделах «алгоритмы, компенсирующие артефакты» и «алгоритмы, основанные на CS и DL» дано краткое описание пяти алгоритмов, а также представлены примеры реконструкций различных моделей ГДО с их использованием. В своем изложении мы соблюдаем историческую хронологию и последовательно переходим от менее эффективных ранее разработанных алгоритмов к более эффективным современным алгоритмам. В разделе «алгоритмы, компенсирующие артефакты» представлены три алгоритма. Не все из них позволяют получить точную реконструкцию даже при сравнительно большом количестве проекций (20—25). Это мультипликативный ART (multiplicative ART, MART) с нелинейной фильтрацией [33, 34]; MART, использующий априорную информацию о дискретных значениях реконструируемой функции (MART with a priory information, MART-AP) [35, 36], и MART одновременной реконструкции с учетом распределения теней от контрастных структур (simultaneous MART with shadow allowance, SMART-SA) [37]. В разделе «алгоритмы, основанные на CS и DL» описаны современные алгоритмы, являющиеся модификациями известного CS-алгоритма ART с регуляризацией посредством минимизации нормы полной вариации (ART with TV-regularization, ART-TV) [26], и позволяющие получить точную реконструкцию по малому числу ракурсов. Это ART-TV с адаптивной сегментацией (ART-TV with adaptive segmentation, ART-TVS) [38, 39] и ART-TVS с DL-фильтрацией (ART-TVS with DL-filtering, ART-TVS-DL) [40]. Наконец, в разделе «заключение и дальнейшие исследования» сформулированы выводы о современном состоянии алгоритмической базы МРКТ быстропротекающих процессов и определены стратегии ее дальнейшего развития.

АЛГОРИТМЫ, КОМПЕНСИРУЮЩИЕ АРТЕФАКТЫ

Если реконструировать изображение с помощью стандартных ART [16—18] по очень малому числу проекций, то на томограммах неизбежно появляются полосовые артефакты [41], которые искажают изображение и не позволяют распознать мелкие высокочастотные детали. Начальный этап наших разработок [33—37, 42] — это бесконечная и не всегда успешная борьба с этими артефактами. Три алгоритма, которые представлены в этом разделе, — это далеко не весь наш опыт подобного толка. Однако именно эти три алгоритма позволяют проследить динамику развития иссле-

довательской мысли. Любопытно, что изначально мы пытались работать с экспериментальными данными, полученными на рентгеновских пленках и экранах с запоминанием (подраздел «MART с нелинейной фильтрацией»). И только после ряда неудач пришло осознание того, что в условиях сильной недостаточности данных прежде всего нужно научиться точно восстанавливать изображение по идеальным модельным данным (подразделы «MART-AP» и «SMART-SA»).

MART с нелинейной фильтрацией. В начале — середине 2000-х добиться более высокого качества реконструкции в МРКТ мы пытались, сочетая алгебраическую реконструкцию с различными методами предобработки синограмм и постобработки восстановленных изображений. Одним из наиболее эффективных методов постобработки оказался метод нелинейной фильтрации, основанный на формировании нелинейных функций соответствия (corresponding functions, CF) между интенсивностью изображения и цветом в палитре [43]. Значением аргумента CF является интенсивность пикселя f, а значением функции — цвет или индекс цвета в палитре g. Мы использовали сочетания весовой и аналитической CF. Алгоритм формирования весовой CF кратко может быть описан следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Сформировать стандартную линейную CF.

Шаг 2. Подсчитать количество пикселей каждого цвета палитры и вычислить вектор весов, размер которого равен количеству цветов (индексов цветов) в палитре.

Шаг 3. Пересчитать значения линейной CF с учетом полученной статистической информации. В приведенном ниже примере использовался сплайн 1-й степени.

Идея формирования аналитической CF заключается в применении нелинейных цветовых координатных шкал для выполнения соответствия между интенсивностью пикселя и цветом. Для построения аналитических CF применяются элементарные функции и их комбинации. Так в приведенном ниже примере использовалась экспоненциальная функция $g(f) = \exp(60f)$. На рис. 1 представлен пример реконструкции сечения обжатой взрывом железной оболочки (рис. 1*а*) по 24 рентгенографическим проекциям [33, 34]. На рис. 1*б* показана томограмма сечения оболочки, восстановленная с использованием стандартного MART [16]. Результат применения весовой CF к полученной томограмме представлен на рис. 1*в*. При формировании данного изображения также применялся алгоритм интерполяции цветов

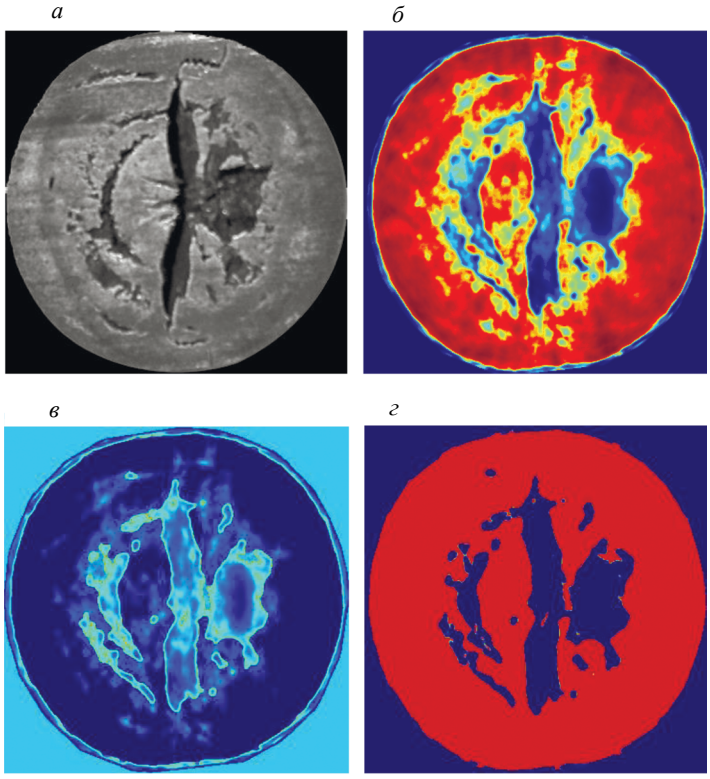

Рис. 1. Фотография сечения оболочки после разреза (*а*), реконструкция сечения по 24 ракурсам с помощью MART (*б*), результаты обработки томограммы с помощью весовой CF (*в*) и комбинации весовой и экспоненциальной CF (*г*).

внутри ячеек [44], когда пиксели ассоциируются с узлами регулярной 2D-сетки. Видно, что удалось выделить информативные контуры внутренних разрушений оболочки и при этом сохранить оттенки интенсивности внутри изображения. Наконец, на рис. 1*г* приведен результат воздействия экспоненциальной CF на изображение, обработанное с помощью весовой функции. При выборе вида аналитической CF мы использовали априорную информацию об однородности плотных структур объекта, дающую основание представить внутреннюю картину разрушений в палитре двух цветов. В результате удалось получить сегментированное изображение и акцентировано выделить границы информативных областей, которые по сути являются воздушными полостями оболочки. Из рис. 1 видно, что полученный после нелинейной фильтрации результат свободен от полосовых артефактов, хотя, конечно, достаточно далек от истинного сечения оболочки.

MART-AP. Алгоритм MART-AP также базируется на стандартном MART, но при этом использует априорную информацию о дискретных значениях реконструируемой функции. Основная идея алгоритма состоит в том, что организуется цикл внешних итераций, на каждой из которых работает MART с его внутренними итерациями. При этом поправки в приближение решения вносятся с учетом так называемой «маски априорных значений», которая содержит априорное знание о дискретных значениях реконструируемой функции, синтезируется посредством пороговой сегментации и подстраивается по результатам выполнения каждой «внешней» итерации. По сути MART-AP является алгоритмом дискретной томографии [45] и ориентирован на реконструкцию кусочно-постоянных структур. В дискретной томографии кроме массива проекционных данных известным также считается набор дискретных значений реконструируемой функции $\{f^k\}_1^K$, таких, что каждое k-значение f^k должна априори принимать целая группа ячеек, объединенных в k-кластер. Здесь K — число кластеров и соответственно кусочно-постоянных структур объекта. Маска **M** является результатом преобразования $\{f^k\}_1^K \to \{N^l\}_0^K$, где $\{N^l\}_0^K$ — множество натуральных чисел в интервале (0, K), l — индекс кластера маски. На каждой внешней (s + 1)-итерации ячейки маски принимают значения из множества $\{N^l\}_0^K$. Причем в интервале (1, K) эти значения соответствуют индексам кусочно-постоянных структур, которые удалось оценить на предыдущей s-й итерации. Значение 0 показывает, что данным ячейкам области реконструкции пока не удалось поставить в соответствие какой-либо из K индексов. Итерационную схему алгоритма MART-AP можно представить в виде последовательности следующих шагов.

Шаг 1. Задать начальную оценку функции объекта $\mathbf{f}^{(0)}$ и маски $\mathbf{M}^{(0)}$.

Шаг 2. Для $s = 0, 1, 2, \ldots$ вычислить приближение $\mathbf{f}^{(s+1)}$ по алгоритму MART с учетом маски $\mathbf{M}^{(s)}$.

Шаг 3. Сгладить результат реконструкции $\mathbf{f}^{(s+1)}$ низкочастотным фильтром.

Шаг 4. Вычислить значения маски $\mathbf{M}^{(s+1)}$.

Шаг 5. Если $\mathbf{M}^{(s+1)} \neq \mathbf{M}^{(s)}$, то перейти на шаг 2, иначе — на шаг 6.

Шаг 6. Завершить выполнение алгоритма.

На рис. 2 представлены результаты реконструкции 2D-численной модели Хенсона [35, 46] по 9 ракурсам. Сверху слева показана сама модель (*а*), сверху справа — результат реконструкции по MART без учета априорной информации (*б*). Нижняя строка изображений демонстрирует работу алгоритма MART-AP: слева представлен конечный результат, полученный на 101-й внешней итерации (*в*); а справа — соответствующая ему маска, рассчитанная на предпоследней 100-й итерации (*г*). Рис. 2 показывает, что MART-AP, использующий априорную информацию о дискретных значениях кусочно-постоянных структур объекта, позволяет не только избежать артефактов, но и получить томограмму, близкую к исходной модели. И это в условиях достаточно малого числа ракурсов (9).

SMART-SA. В основе SMART-SA — другой известный алгебраический алгоритм MART с одновременной реконструкцией [18]. Особенность нашей модификации данного алгоритма заключается в том, что поправки для различных зон области реконструкции вычисляются по-разному — с учетом картины распределения теней от высококонтрастных структур. Сама идея SMART-SA родилась в результате анализа механизма образования полосовых артефактов, которые при наличии у объекта высококонтрастных структур являются наиболее ярко выраженными. Любой алгебраический алгоритм в случае квази-однородной структуры восстанавливаемой функции равномерно распределяет невязку по всей области реконструкции. Если же объект имеет высококонтрастный перепад, этот перепад «размазывается» вдоль луча при проецировании, формируя полосу. При этом контрастная структура объекта как бы «затеняет» собой остальные структуры. Далее при переходе к следующему ракурсу в процессе итерационной реконструкции появляется другая полоса, которая накладывается на первую. Таким образом, полосы, полученные на предыдущих ракурсах, оказывают влияние на воспроизведение структур на томограмме, формируя крупные артефакты сеточной структуры. Мы предположили, что для компенсации артефактов в

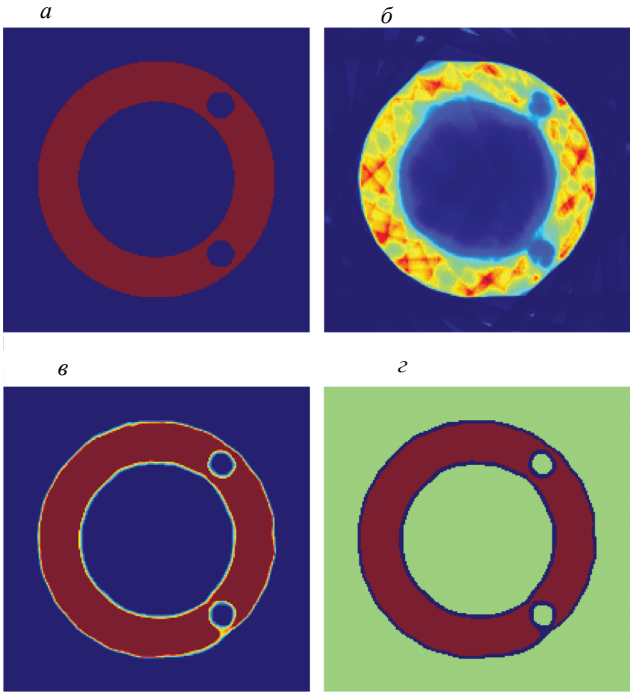

Рис. 2. Модель Хенсона (*а*), ее реконструкции по 9 ракурсам с помощью стандартного MART (*б*) и MART-AP (*в*), маска, рассчитанная на предпоследней 100-й итерации (*г*).

те ячейки области реконструкции, которые находятся в тени от контрастной структуры, нужно вносить поправку некоторым отличным от стандартного способом. Для того чтобы иметь такую возможность, необходимо построить некую теневую картину от контрастной структуры, которую по аналогии с маской априорных значений (см. предыдущий подраздел) уместно назвать «маской теней».

Маска теней (рис. 3*г*) отображает ячейки контрастной структуры (коричневый), ячейки, имеющие промежуточные цвета jet-палитры (их большинство), и ячейки, примыкающие к границам

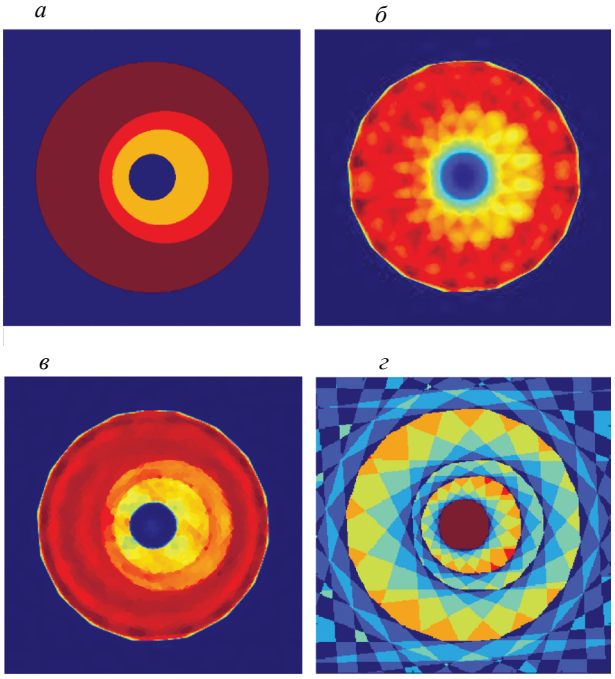

Рис. 3. Модель с полостью и двумя границами раздела (*а*), ее реконструкции по 9 ракурсам с помощью стандартного SMART (*б*) и SMART-SA (*в*), а также маска теней (*г*).

структур (синий). При введении поправок в коричневые ячейки учитываются все ракурсы. В ячейки с промежуточными цветами поправки вводятся уже с учетом меньшего числа ракурсов (определяется маской), а в ячейки синего цвета, примыкающие к границам, — только однократно. Поскольку однократного введения поправок, как правило, недостаточно для корректного воспроизведения границы, мы ввели в алгоритм адаптивное сглаживание. В результате алгоритм SMART-SA можно описать следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Восстановить изображение по SMART.

Шаг 2. Выполнить интерактивное сегментирование области контрастных структур.

Шаг 3. Выбрать контрастную структуру и построить для нее маску теней.

Шаг 4. Восстановить изображение по SMART, учитывая для каждой ячейки то число ракурсов, которое определяется маской теней. При этом на каждой итерации выполнять адаптивное сглаживание тех областей, в которые поправка вводится однократно.

Шаг 5. Если объект содержит другие контрастные структуры, то перейти на шаг 2, иначе — на шаг 6.

Шаг 6. Завершить выполнение алгоритма.

Результаты реконструкции 2D-численной модели газодинамической среды с полостью и двумя сферическими границами раздела плотности [37] по 9 ракурсам представлены на рис. 3. Видно, что SMART-SA позволяет получить томограмму (см. рис. 3*в*) без артефактов с правильно воспроизведенными границами структур. Можно добавить, что прекрасно работает сочетание алгоритмов SMART-SA и MART-AP. Так, если доработать томограмму, восстановленную по SMART-SA, с помощью MART-AP, то получим результат, визуально почти неотличимый от исходной модели [37].

АЛГОРИТМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА CS И DL

В этом разделе мы представляем наши современные разработки: ART-TVS и ART-TVS-DL. Эти алгоритмы разрабатывались, когда уже была доказана возможность точной реконструкции фантома Шеппа—Логана менее чем по 10 ракурсам (см., например, [30]). Поэтому данные алгоритмы преследовали цель не улучшить качество реконструкции, а минимизировать число ракурсов, по которым еще возможна точная реконструкция.

ART-TVS. Алгоритм ART-TVS включает две стадии. Первая стадия — это ART-TV [18]. Вторая стадия — это эвристическая процедура адаптивной сегментации, реализованная с использованием известного метода наращивания областей [47]. Далее организуется цикл, в котором эти две стадии работают последовательно одна за другой. Особенностью алгоритма ART-TVS является тот факт, что после сегментации на шаге 2 (см. ниже) мы далее применяем алгоритм ART-TV посегментно, обрабатывая не все изображение сразу, а последовательно выбираемые сегменты из сформированного списка сегментов. Последовательность шагов алгоритма ART-TVS может быть представлена следующим образом.

Шаг 1. Восстановить изображение с помощью алгоритма ART-TV.

Шаг 2. Применить к полученному изображению метод адаптивной сегментации и сформировать список сегментов, подлежащих дальнейшей обработке.

Шаг 3. Выбрать случайным образом необработанный сегмент из списка сегментов.

Шаг 4. Восстановить выбранный сегмент с помощью алгоритма ART-TV. При этом в пиксели, принадлежащие другим сегментам, поправки не вводятся.

Шаг 5. Удалить обработанный сегмент из списка сегментов.

Шаг 6. Если список сегментов не пуст, то перейти на шаг 3, иначе — на шаг 7.

Шаг 7. Проверить стоп-критерий. Если он не выполняется, то перейти на шаг 2. В противном случае закончить выполнение алгоритма.

В качестве стоп-критерия используется скорость сходимости итерационного процесса. Стадию сегментации мы сделали адаптивной посредством рандомизации выбора начальной точки наращивания [48]. Это позволило получить алгоритм сегментации минимально зависимый от интерактивного вмешательства оператора и сократить время работы ART-TVS.

На рис. 4 представлены результаты реконструкции модели с полостью и двумя границами раздела по различному числу ракурсов — 3, 4 и 8. Причем нижняя строка изображений восстановлена по проекциям, зашумленным 1 % Гауссовым шумом. Из рис. 4 видно, что модель удается восстановить точно (или почти точно) по 4 идеальным (*б*) и 8 зашумленным (*г*) проекциям.

ART-TVS-DL. Сходимость алгоритма ART-TVS к истинному решению во многом зависит от того, насколько точно отработал ART-TV на шаге 1 (см. предыдущий подраздел). Для улучшения точности приближения решения было решено ввести в алгоритм DL-фильтрацию на основе глубокой

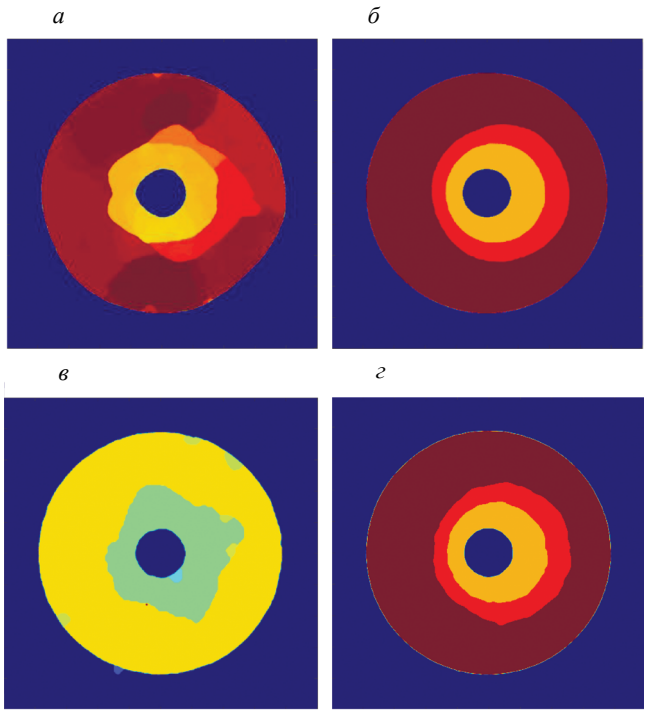

Рис. 4. Реконструкции модели с полостью и двумя границами раздела по 3 проекциям (*а*), 4 проекциям (*б*), 4 зашумленным проекциям (*в*) и 8 зашумленным проекциям (*г*).

сверточной нейронной сети (deep convolution neural network, DCNN) архитектуры U-Net [49]. Таким образом, если описывать модернизированный алгоритм ART-TVS-DL последовательностью шагов, то в ней по сравнению с ART-TVS добавляется еще один шаг, а именно шаг 2 — DL-фильтрация приближения, полученного с помощью алгоритма ART-TV, т.е. сначала выполняется реконструкция объекта с помощью алгоритма ART-TV. Полученная оценка улучшается с помощью нейронной сети, обученной в соответствии с исследуемым классом объекта. Далее уточненная оценка обрабатывается итерационно с помощью алгоритма ART-TVS (см. предыдущий подраздел).

Для обучения DCNN необходимо сформировать обучающую выборку, которая представляют собой пары вход-выход. На вход нейронной сети подаются оценки томограмм после работы алгоритма ART-TV, а на выход — соответствующие им вариации исходного объекта (его виртуальные модели). Сложность формирования обучающей выборки состоит в том, что изначально мы в лучшем случае знаем только один объект данного класса, а именно сам фантом, подлежащий восстановлению. Поэтому необходимо задать набор параметров, который будет определять множество виртуальных моделей объекта данного класса и соответственно создать генератор этих вариаций. Например, в случае модели Хенсона класс объекта определяется следующими параметрами: внутренним радиусом, толщиной оболочки, количеством круглых полостей в оболочке, массивами их диаметров и полярных координат их центров, характеризующих местоположение полостей. После того, как набор виртуальных моделей объекта создан, для каждой модели решается прямая задача и по полученным синограммам выполняется реконструкция моделей с помощью алгоритма ART-TV. В результате получается массив томограмм, который подается на вход нейронной сети. На выходе же каждой такой томограмме ставится в соответствие виртуальная модель, для которой выполнялось решение прямой задачи и реконструкция по ART-TV. После обучения нейронной сети на подготовленной таким образом обучающей выборке выполняется DL-фильтрация оценки томограммы конкретного исследуемого объекта.

Динамика реконструкции модели Хенсона с помощью алгоритма ART-TVS-DL по 3 ракурсам показана на рис. 5. Изображение сверху слева (*а*) — реконструкция по ART-TV. Сверху справа (*б*) представлен результат ее DL-фильтрации. Нижняя строка изображений демонстрирует результаты работы ART-TVS на 150 (снизу слева (*в*)) и последней 175 итерациях (снизу справа (*г*)). Видно, что последнее изображение визуально неотличимо от модели, представленной на рис. 2*а*.

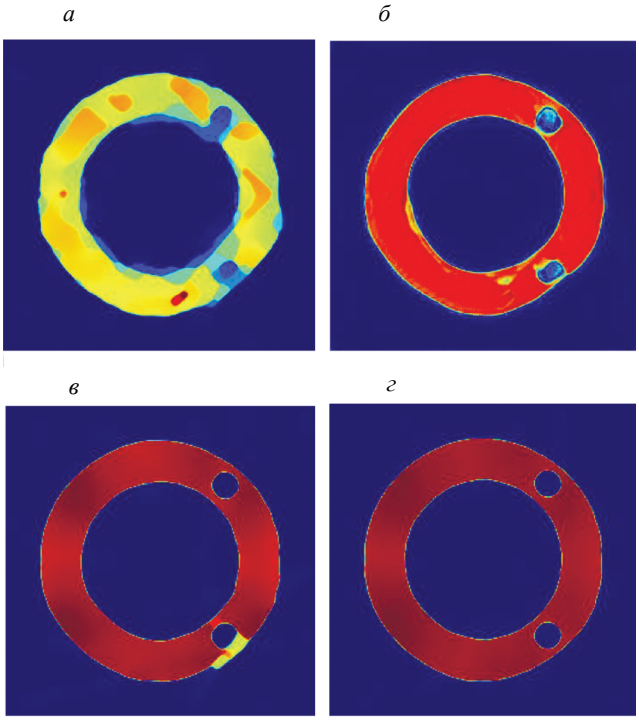

Рис. 5. Динамика реконструкции модели Хенсона по 3 ракурсам: томограмма, восстановленная по ART-TV (*а*), результат ее DL-фильтрации (*б*), результаты работы ART-TVS на 150 (*в*) и последней 175 (*г*) итерациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье описаны пять алгоритмов реконструкции изображений по малому числу ракурсов, которые с точки зрения авторов наглядно отражают динамику развития разрабатываемой в РФЯЦ-ВНИИТФ алгоритмической базы малоракурсной компьютерной томографии быстропротекающих процессов. Три алгоритма (MART с нелинейной фильтрацией, MART-AP и SMART-SA) — это алгоритмы, компенсирующие артефакты, и два других (ART-TVS и ART-TVS-DL) — современные алгоритмы, основанные на технологиях CS и DL и направленные на минимизацию числа ракурсов, по которым можно точно восстановить томограмму. Приведены изображения, демонстрирующие работу представленных алгоритмов. Все изображения (кроме черно-белой фотографии сечения обжатой взрывом оболочки) представлены в едином ключе с использованием jet-палитры. Поскольку цель была — описать динамику развития алгоритмов на качественном уровне, изображения даны без указания шкал палитры. Также мы не стали использовать количественные характеристики для анализа изображений и ограничились их визуальной оценкой. Тем не менее, несмотря на сжатость изложения, представленный обзор позволяет сделать главный вывод. Уже сегодня существуют алгоритмы, которые позволяют точно реконструировать модели ГДО по очень малому числу ракурсов.

Однако насколько это число мало все же должны показать дальнейшие исследования. Для простых моделей, не содержащих высокочастотные структуры, мы получили минимум — 3-4 ракурса. В то же время наши исследования [40] показали, что QR-код, являющийся примером объекта с тонкой высокочастотной структурой, удается восстановить с помощью ART-TVS-DL только по 12 проекциям. По меркам томографии быстропротекающих процессов это слишком большая цифра и должна быть непременно сокращена. Другая задача — это адаптация ART-TVS и ART-TVS-DL к работе с реальными экспериментальными данными. Важно, что сегодня, мы, наконец, реально готовы приступить к ее решению. Однако опыт вчерашнего дня говорит о том, что при переходе к экспериментальным данным минимальное число ракурсов обязательно возрастет. Таким образом, почти наверняка потребуется дальнейшее совершенствование разработанных алгоритмов. Мы связываем это совершенствование с регуляризацией на основе технологий CS и DL [50] и формулируем следующие стратегические направления исследований.

• Дальнейшее развитие, совершенствование и повсеместное внедрение в практику CS-алгоритмов, выполняющих регуляризацию посредством минимизации L_p-нормы ($0 \leq p \leq 1$) изображения или его разреженного представления.

• Применение глубоких нейронных сетей как специализированного инструмента регуляризации в итерационных алгебраических и оптимизационных алгоритмах реконструкции.

• Разработка эффективных гибридных методов регуляризации, объединяющих технологии CS и DL.

Авторы выражают признательность всем своим коллегам из группы малоракурсной томографии РФЯЦ—ВНИИТФ за многолетнее плодотворное сотрудничество, без которого получение результатов, представленных в настоящей статье, было бы невозможно. Также авторы благодарны сотрудникам отделения радиационной физики за проведение рентгенографических экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козловский В.Н.* Информация в импульсной рентгенографии. Снежинск: РФЯЦ—ВНИИТФ, 2006.

2. *Herman G.T.* Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections / 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2009.

3. *Nielsen K.* Design and performance of the DARTH second axis accelerator / Proceedings of IEEE International Pulsed Power Conference. Chicago: IEEE, 2011. P. 1048—1051. https://doi.org/10.1109/PPC.2011.6191640

4. *Ong M.M., Kihara R., Zentler J.M., Kreitzer B.R., DeHope W.J.* Estimating the reliability of Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) flash x-ray (FXR) machine / Proceedings of IEEE International Pulsed Power and Plasma Science Conference. Albuquerque: IEEE, 2007. V. 2. P. 1078—1081. https://doi.org/10.1109/PPPS.2007.4345985

5. *Pang T.F.* AWE multi-axis radiographic facility: A review of 3D-reconstructions from limited data / Bayesian Interface and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering. 20th International Workshop. AIP Conference Proceedings, 2001. V. 568. P. 521—530. https://doi.org/10.1063/1.1381914

6. *Dzitko H., Mouillet M., Georges A., Gouin B.* Reliability study of the AIRIX accelerator over a functioning period of ten years (2000—2010) / Proceedings of Particle Accelerator Conference. New York: Marriott Marquis, 2011. P. 1882—1884.

7. *Kaizhi Z., Long W., Hong L., Zhiyong D., Wendou W., Wenwei Z., Meng W., Jin L., Anming Y., Yutong X., Sifu C., Huacen W., Guangsen D., Jinshui S., Linwen Z., Jianjun D., Bonan D.* Dragon-I injector based on the induction voltage adder technique // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2006. V. 9. No. 8. Article No. 080401. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.9.080401

8. *Логачев П.Л., Кузнецов Г.И., Корепанов А.А., Акимов А.В., Шиянков С.В., Павлов О.А., Старостенко Д.А., Фотькин Г.А.* Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2 // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 6. С. 42—49. [*Logachev P.V., Kuznetsov G.I., Korepanov A.A., Akimov A.V., Shiyankov S.V., Starostenko D.A., Fat'kin G.A.* LIU-2 linear induction accelerator // Instrum. Exp. Tech. 2013. V. 56. No. 6. P. 672—679. https://doi.org/10.1134/S0020441213060195]

9. *Akimov A., Bak P., Batrakov A., Chernitsa A., Khrenkov S., Nikitin O., Pavlov O., Zhelezkin D., Zhivankov K.* Development and testing of high-voltage cells for 2 kA, 20 MeV linear induction accelerator / Proceedings of IEEE International Conference on Pulsed Power. Brighton: IEEE, 2017. P. 1—3. https://doi.org/PPC.2017.8291336

10. *Akimov A., Bak P., Egorychev M., Kolesnikov P., Logunov V., Nikitin O.* PULSE forming networks development for a 60-380 ns pulsed power supply for 2 kA 20 MeV linear induction accelerator / Proceedings of IEEE International Conference on Pulsed Power. Brighton: IEEE, 2017. P. 1—3. https://doi.org/PPC.2017.8291090

11. *Fatkin G., Baluev A., Bekhtenev E., Kotov E., Ottmar A., Pavlenko A., Panov A., Senchenko A., Serednyakov S., Batrakov A., Macheret Ya., Mamkin V., Shtro K., Selivanov A., Selivanov P., Singatulin S.* LIA-20 control system project / Proceedings of 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems. Barcelona: JACoW, 2018. P. 1485—1488. https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA052

12. *Panov A., Fatkin G.* LIA-20 experiment protection system / Proceedings of 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems. Barcelona: JACoW, 2018. P. 660—662. https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-TUPHA103

13. *Батраков А.М., Васильев М.Ю., Котов Е.С., Штро К.С.* Прецизионный делитель высоковольтных импульсных сигналов // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 2. С. 58—69. [*Batrakov A.M., Vasilev M.Yu., Kotov E.S., Shtro K.S.* A precision high voltage pulse divider // Instrum. Exp. Tech. 2020. V. 63. No. 2. P. 188 — 198. https://doi.org/10.1134/S0020441220020074]

14. *Бак П.А.*, *Батраков А.М.*, *Бехтенёв Е.А.*, *Васильев М.Ю.*, *Живанков К.И.*, *Котов Е.С.*, *Мачерет Я.М.*, *Павленко А.В.*, *Павлов О.А.*, *Сенченко А.И.*, *Середняков С.С.*, *Фатькин Г.А.*, *Штро К.С.*

Комплекс цифровой осциллографии ускорителя ЛИУ-20 / Приборы и техника эксперимента. 2021. № 2. С. 49—64. [*Bak P.A.*, *Batrakov A.M., Bekhtenev E.A.*, *Vasilev M.Yu., Zhivankov K.I., Kotov E.S.*, *Macheret Ya.M., Pavlenko A.V., Pavlov O.A., Senchenko A.I., Serednyakov S.S., Fat'kin G.A.*, *Shtro K.S.* Waveform monitoring complex for accelerator LIA-20 // Instrum. Exp. Tech. 2021. V. 64. No. 2. P. 216—229. https://doi.org/10.1134/S0020441221020019]

15. Новости научного портала «Атомная энергия 2.0». 25 марта 2022 г. https://www.atomic-energy.ru/news/2022/03/25/123117

16. *Gordon R., Bender R., Herman G.T.* Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // J. Theor. Biol. 1970. V. 29. No. 3. P. 471—481. https://doi.org/10.1016/0022-5193(70)90109-8

17. *Gilbert P.* Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections // J. Theor. Biol. 1972. V. 36. No. 1. P. 105—117. https://doi.org/10.1016/0022-5193(72)90180-4

18. *Andersen A.H., Kak A.C.* Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm // Ultrasonic Imaging. 1984. V. 6. No. 1. P. 81—94. https://doi.org/10.1177/016173468400600107

19. *Sauer K.D., Bouman C.A.* A local update strategy for iterative reconstruction from projections // IEEE Trans. Signal Process. 1993. V. 41. No. 2. P. 534—548. https://doi.org/ 10.1109/78.193196.

20. *Bouman C.A., Sauer K.D.* A unified approach to statistical tomography using coordinate descent optimization // IEEE Trans. Image Process. 1996. V. 5. No. 3. P. 480—492. https://doi.org/10.1109/83.491321

21. *Erdogan H., Fessler J.A.* Ordered subsets algorithms for transmission tomography // Phys. Med. Biol. 1999. V. 44. No. 11. P. 2835—2851. https://doi.org/10.1088/0031-9155/44/11/311

22. *Thibault J.-B., Sauer K.D., Bouman C.A., Hsieh J.A.* Three-dimensional statistical approach to improved image quality for multislice helical CT // Med. Phys. 2007. V. 34. No. 11. P. 4526—4544. https://doi.org/10.1118/1.2789499

23. *Yu Z., Thibault J.-B., Bouman C.A., Sauer K.D., Hsieh J.A.* Fast model-based X-ray CT reconstruction using spatially nonhomogeneous ICD optimization // IEEE Trans. Image Process. 2011. V. 20. No. 1. P. 161—175. https://doi.org/10.1109/TIP.2010.2058811

24. *Donoho D.L.* Compressed sensing // IEEE Trans. Inf. Theory. 2006. V. 52. No. 4. P. 1289—1306. https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582

25. *Candès E.J., Romberg J., Tao T.* Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements // Commun. Pure Appl. Math. 2006. V. 59. No. 8. P. 1207—1223. https://doi.org/10.1088/0266-5611/23/3/008

26. *Yu H., Wang G.* Compressed sensing based interior tomography // Phys. Med. Biol. 2009. V. 54. No. 9. P. 2791—2805. https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/9/014

27. *Beck A., Teboulle M.* A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems // SIAM J. Imaging Sci. 2009. V. 2. No. 1. P. 183—202. https://doi.org/ 10.1137/080716542

28. *Chang M., Li L., Chen Z., Xiao Y., Zhang L., Wang G.* A few-view reweighted sparsity hunting (FRESH) method for CT image reconstruction // J. X-Ray Sci. Technol. 2013. V. 21. No. 2. P. 161—176. https://doi.org/10.3233/XST-130370

29. *Sun Y., Tao J.* Iterative reconstruction from few views by l_0-norm optimization // Chin. Phys. B. 2014. V. 23. No. 7. Article No. 078703. https://doi.org/10.1088/1674-1056/23/7/078703

30. *Storath M., Weinmann A., Frikel J., Unser M.* Joint image reconstruction and segmentation using the Potts model // Inverse Problems. 2015. V. 31. No. 2. Article No. 025003. https://doi.org/10.1088/0266-5611/31/2/025003

31. *Jin K.H., McCann M.T., Froustey E., Unser M.* Deep convolutional neural network for inverse problems in imaging // IEEE Trans. Med. Imaging. 2017. V. 26. No. 9. P. 4509—4522. https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2713099

32. *Arridge S.R., Maass P., Öktem O., Schönlieb C.-B.* Solving inverse problems using data-driven models // Acta Numerica. 2019. V. 28. P. 1—174. https://doi.org/10.1017/S0962492919000059

33. *Konovalov A.B., Mogilenskikh D.V., Vlasov V.V., Kiselev A.N.* Algebraic reconstruction and post-processing in incomplete data computed tomography: from X-rays to laser beams // Vision Systems: Applications / Eds. Obinata G., Dutta A. Vienna: I-Tech Education and Publishing, 2007. P. 487—518. https://doi.org/10.5772/5003

34. *Коновалов А.Б., Могиленских Д.В., Козлов Е.А., Власов В.В., Киселев А.Н., Ковалев Е.В., Захаров М.Н., Повышев В.Н., Ставриецкий В.И.* Контроль откольных и сдвиговых разрушений в обжатой взрывом сферической железной оболочке методом малоракурсной гамма-томографии // Дефектоскопия. 2008. № 1. С. 19—31 [*Konovalov A.B., Mogilenskikh D.V., Kozlov E.A., Vlasov V.V., Kiselev A.N., Kovalev E.V., Zakharov M.N., Povyshev V.N., Stavrietskii V.I.* Few-view gamma tomography used to monitor scabbing and shear fracture in a spherical iron shell compressed by explosion // Russ. J. Nondestruct. Test. 2008. V. 44, No. 1, P. 15 — 24. https://doi.org/10.1134/S1061830908010026]

35. *Vlasov V.V., Konovalov A.B., Uglov A.S.* An a priori information based algorithm for artifact preventive reconstruction in few-view computed tomography / Proceedings of IEEE International Symposium on Communications, Control and Signal Processing. Roma: IEEE, 2012. Article No. 042. https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2012.6217778

36. *Konovalov A.B., Vlasov V.V.* Spatial resolution analysis for few-views discrete tomography based on MART-AP algorithm // ISRN Signal Process. 2013. V. 2013. Article No. 356291. https://doi.org/10.1155/2013/356291

37. *Vlasov V.V., Konovalov A.B., Uglov A.S.* Few-views image reconstruction with SMART and allowance for contrast structure shadows / Proceedings of International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns 2015. Part I. Lect. Notes Comput. Sci. 2015. V. 9256. P. 667—677. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23192-1_56

38. *Vlasov V.V., Konovalov A.B., Kolchugin S.V.* Hybrid algorithm for few-views computed tomography of strongly absorbing media: algebraic reconstruction, TV-regularization, and adaptive segmentation // J. Electron. Imaging. 2018. V. 27. No. 4. Article No. 043006. https://doi.org/10.1117/1.JEI.27.4.043006

39. *Власов В.В., Коновалов А.Б., Кольчугин С.В.* Совместная реконструкция и сегментация изображений: сравнение двух алгоритмов малоракурсной томографии // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 6. С. 1008—1020. https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-6-1008-1020

40. *Vlasov V.V., Konovalov A.B.* Minimizing the number of views in few-view computed tomography: A deep learning approach / Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. Sochi: IEEE, 2022. Accepted for publication.

41. *Rangayyan R.M., Gordon R.* Streak preventive image reconstruction with ART and adaptive filtering // IEEE Trans. Med. Imaging. 1982. V. MI-1. No. 3. P. 173—178. https://doi.org/10.1109/TMI.1982.4307569

42. *Konovalov A.B., Kiselev A.N., Vlasov V.V.* Spatial resolution in few-view computed tomography using algebraic reconstruction techniques // Pattern Recognition and Image Analysis. 2006. V. 16. No. 2. P. 249—255. https://doi.org/10.1134/S105466180602012X

43. *Lisin A.A., Mogilenskikh D.V., Pavlov I.V.* Nonlinear color interpretation of physical processes // Recent Progress in Computational Sciences and Engineering / Eds. Simos T., Maroulis G. London: CRC Press, 2006. P. 337—340. https://doi.org/10.1201/9780429070655-83

44. *Mogilenskikh D.V., Pavlov I.V.* Color interpolation algorithms in visualizing results of numerical simulations / Visualization and Imaging in Transport Phenomena / Eds. Sideman S., Landesberg A. Ann. N. Y. Acad. Sci. 2002. V. 972. Part. I. P. 43—52. https://doi.org/ j.1749-6632.2002.tb04551.x

45. *Herman G.T., Kuba A.* Eds. Discrete Tomography: Foundations, Algorithms and Applications. Boston: Birkhauser, 1999.

46. *Hanson K.M.* Bayesian and related methods in image reconstruction from incomplete data // Image Recovery: Theory and Applications / Ed. Stark H. Orlando: Academic, 1987. P. 79 — 125.

47. *Mehnert A., Jackway O.* An improved seeded region growing algorithm // Pattern Recognit. Lett. 1997. V. 18. No.10. P. 1065—1071. https://doi.org/10.1016/S0167-8655(97)00131-1

48. *Mazouzi S., Batouche M.* Range image segmentation by randomized region growing and Bayesian edge regularized // J. Comput. Sci. 2007. V. 3. No. 5. P. 310—317. https://doi.org/ 10.3844/jcssp.2007.310.317

49. *Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / Proceedings of International Conference on Medical Image Computing and Computed Assisted Intervention 2015. Part III. Lect. Notes Comput. Sci. 2015. V. 9351. P. 234—241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

50. *Ravishankar S., Ye J.C., Fessler J.A.* Image reconstruction: from sparsity to data-adaptive methods and machine learning // Proc. of IEEE. 2020. V. 108. No. 1. P. 86—109. https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2936204

УДК 620.179.152

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИГНАЛОВ СО СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

© 2022 г. С.П. Осипов[1, 2, *], С.А. Щетинкин[2], Е.Ю. Усачёв[2], С.В. Чахлов[1, 2, **], О.С. Осипов[3]

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30
[2]ООО Диагностика-М, Россия 109316 Москва, Волгоградский пр-т, 42
[3]Medialooks, Россия 236016 Калининград, ул. Александра Невского, 59
E-mail: [*]osip1809@rambler.ru; [**]chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 13.04.2022; после доработки 22.04.2022
Принята к публикации 27.04.2022

Предложена математическая модель искажения исходного радиометрического сигнала сцинтилляционным детектором для случая регистрации непрерывного рентгеновского излучения в процессе формирования цифровых радиографических изображений. Модель учитывает распределение исходного сигнала по времени, время регистрации излучения, разрядность АЦП, временные и амплитудные параметры быстрой и медленной составляющих процесса высвечивания в сцинтилляционном детекторе. Разработан алгоритм восстановления сигнала после сцинтиллятора, основанный на предварительной информации о параметрах сцинтилляционного детектора для непрерывного рентгеновского излучения. Предложены алгоритмы оценки амплитудных и временных параметров быстрой и медленной составляющих процесса высвечивания в сцинтилляционном детекторе для источников рентгеновского излучения. Проведена серия вычислительных экспериментов и на основе анализа ее результатов продемонстрирована эффективность разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, цифровая радиография, сцинтилляционные детекторы, быстрые и медленные компоненты высвечивания, математическое моделирование, имитационное моделирование, восстановление сигналов после сцинтиллятора.

DOI: 10.31857/S0130308222060057; **EDN:** BNAJHH

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость повышения качества контроля объектов различной природы методами цифровой радиографии (ЦР) и рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) обуславливает настоятельную потребность в совершенствовании способов формирования соответствующей первичной информации с учетом особенностей процессов регистрации рентгеновского излучения. Сцинтилляторы широко применяются в качестве первичных преобразователей радиации в световой поток с последующей его регистрацией фотоприемником и трансформацией получающихся аналоговых сигналов в цифровые [1—3]. Преобразование энергии рентгеновского излучения, поглощенного в сцинтилляторе, в энергию светового потока (высвечивание) является инерционным [1, 3]. Инерционность высвечивания приводит к искажению исходных сигналов сцинтилляционным детектором и, следовательно, к ухудшению пространственного разрешения систем ЦР и РКТ [4—6]. Учет этого фактора в алгоритмах формирования обработки информации в системах ЦР и РКТ, а также в системах досмотрового контроля с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий невозможен без полной информации о параметрах быстрой и медленной составляющих процесса высвечивания энергии в сцинтилляторе [1, 7—9]. Временное изменение сигнала на выходе фотопреобразователя описывают экспонентой либо суммой экспонент [10—14]. В научной литературе не в полной мере обсуждены вопросы, связанные с определением параметров быстрой и медленной составляющих процесса высвечивания и восстановлением сигналов сцинтилляционным детектором для источников непрерывного рентгеновского излучения.

1. МОДЕЛЬ ИСКАЖЕНИЯ СИГНАЛА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ

1.1. Представление исходного сигнала

В качестве источников рентгеновского излучения в системах ЦР и РКТ используют, как правило, рентгеновские аппараты непрерывного действия [15].

Остановимся на формировании исходных радиографических изображений в системах сканирующего типа с линейным регистратором рентгеновского излучения. Пусть ось OX связана с направ-

лением сканирования, а ось OY — с линейкой детекторов. Объект контроля перемещается относительно системы, состоящей из источника рентгеновского излучения и линейного детектора, с постоянной скоростью V.

Будем считать сигнал I со сцинтилляционного детектора «идеальным», если он зависит исключительно от ослабления излучения объектом контроля. Для интенсивных источников рентгеновского излучения непрерывного действия традиционным режимом регистрации является интегральный, поэтому I можно интерпретировать как количество энергии фотонов, переданной детектору.

Будем придерживаться модели формирования цифрового радиографического изображения [16, 17]. Согласно этой модели, сигнал I в момент времени t определяется текущей толщиной ОК в длинах свободного пробега P:

$$I(t) = I_0(t)\exp(-P(t)), \tag{1}$$

где $I_0(t)$ — зависимость энергии рентгеновского излучения, переданной детектору, от времени t без объекта контроля. Для непрерывного режима излучения соблюдается равенство $I_0(t) = I_C$.

1.2. Искажение исходного сигнала сцинтилляционным детектором

Пусть в момент времени p в результате воздействия на сцинтиллятор ультракороткого импульса фотонов высвечиваются световые фотоны с общей энергией E, $E = C_E I$. Согласно [10—14], процесс высвечивания описывается функцией $h(t)$, равной сумме n экспоненциальных функций. Для $n = 2$ функция $h(t)$ представима в виде:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t < p \\ A_f \exp\left(-(t-p)/\tau_f\right) + A_s \exp\left(-(t-p)/\tau_s\right), & t \geq p \end{cases}, \tag{2}$$

где A_f, A_s — амплитудные параметры быстрой и медленной составляющих; τ_f, τ_s — временные параметры быстрой и медленной составляющих.

Будем считать, что суммарная энергия светового излучения E высвечивается без потерь. Отсюда следует, что

$$\int_p^\infty \left(A_f \exp\left(-(t-p)/\tau_f\right) + A_s \exp\left(-(t-p)/\tau_s\right)\right)dp = A_f\tau_f + A_s\tau_s.. \tag{3}$$

Введем обозначение:

$$a_f = A_f\Big/\left(A_f\tau_f + A_s\tau_s\right), \qquad a_s = A_s\Big/\left(A_f\tau_f + A_s\tau_s\right). \tag{4}$$

С учетом (2) и (4) искажение $J(t)$ исходного сигнала $I(t)$ сцинтилляционным детектором описывается выражением:

$$J(t) = C_E\int_0^t I(p)h(t-p)\,\mathrm{d}\,p = C_E\int_0^t I(p)\left(a_f \exp\left(-(t-p)/\tau_f\right) + a_s \exp\left(-(t-p)/\tau_s\right)\right)\mathrm{d}\,p. \tag{5}$$

Полученные выражения носят общий характер и могут быть использованы для источников рентгеновского излучения непрерывного действия.

Совокупность выражений (1)—(5) является математической моделью трансформации (искажения) идеальных сигналов для источников рентгеновского излучения сцинтилляционным детектором, учитывающей быструю и медленную составляющие высвечивания.

Данная математическая модель может быть преобразована в соответствующую имитационную модель с последующей ее реализацией, например, в системе для математических вычислений MathCad.

1.3. Интегрирование, дискретизация и оцифровка сигнала на выходе сцинтилляционного детектора

Аналоговый сигнал на выходе сцинтилляционного детектора $J(t)$ интегрируется за время Δt, поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с разрядностью k_{ADC}, где и оцифровывается.

Пусть аналоговый сигнал $J(t)$ определен на интервале от 0 до $t_{\max}$. Допустим, что интегратор обладает свойством мгновенного сброса сигнала, тогда количество точек в дискретизации сигнала $J(t)$ равно $j_{\max}=[t_{\max}/\Delta t]$, здесь и далее $[x]$ — целая часть x. Дискретизация сигнала $J(t)$ будет представлять собой вектор аналоговых величин $\mathbf{Jd}=\left(Jd_1, Jd_2, Jd_3, ..., Jd_{j_{\max}}\right)$:

$$Jd_j = \int\limits_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} J(t)\,\mathrm{d}t,\ j=1...j_{\max}. \tag{6}$$

Аналоговые величины $Jd_1, Jd_2, ..., Jd_{j_{\max}}$ преобразуются в цифровые $D_1, D_2, ..., D_{j_{\max}}$:

$$D_j = \left[\frac{C_{ADC} Jd_j}{\Delta_1}\right],\ j=1...j_{\max},\ \Delta_1 = \frac{\max(\mathbf{Jd})}{2^{k_{ADC}}-1}, \tag{7}$$

где C_{ADC}, $C_{ADC} < 1$ — коэффициент защиты от превышения цифровым сигналом уровня $2^{k_{ADC}}-1$; Δ_1 — аналоговый эквивалент цифровой «1».

При формировании исходного цифрового радиографического изображения линейным детектором вектор **D** будет соответствовать одному детектору линейки и являться основой для построения строки искомого изображения.

Цифровой сигнал **D** для устранения влияния искажений, вызванных сцинтиллятором, поступает на вход процедуры оценки (восстановления) исходного (идеального) цифрового сигнала **DI**, т.е. сигнала $I(t)$, подвергнутого интегрированию и дискретизации и оцифровке согласно (6), (7). Отметим, что с целью возможности сравнения **D** и **DI** необходимо использовать один и тот же аналоговый эквивалент цифровой «1».

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИГНАЛА ПОСЛЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА

2.1. Формулировка задачи восстановления и ее особенности

Сформулируем задачу восстановления применительно к рассматриваемому случаю. Пусть имеется сигнал $I(t)$, который изменяется во времени на интервале от 0 до $t_{\max}$. Сигнал $I(t)$ трансформируется (искажается) в сцинтилляционном детекторе функцией $h(t)$, упомянутой выше, в соответствии с преобразованием (5) и превращается в сигнал $J(t)$.

Уравнение (7) относительно неизвестной функции $I(t)$ по классификации типов интегральных уравнений относится к линейному интегральному уравнению Вольтерра первого рода типа «свертки» [18, 19]. Следует отметить, что в случае ассоциации с понятием «исходный сигнал» функции $P(t)$ (см. формулу (1)), интегральное уравнение (5) превратится в нелинейное интегральное уравнение Вольтерра первого рода типа «свертки» [20].

Оценка функции $I(t)$ по измеренной зависимости $J(t)$ и является целью задачи восстановления в общем случае.

В соответствии с (5), (7):

$$Jd_j \approx C_E \sum_{i=1}^{j} h(t_j - s_i) I(s_i) \Delta T,\ j=1...j_{\max}. \tag{8}$$

Существует множество подходов к решению уравнений вида (5), (8), например, [18—21]. Рассмотрим один из них с учетом особенностей формирования и трансформации исходных сигналов.

Для цифровых сигналов система уравнений (8) в матричном виде выглядит следующим образом:

$$\mathbf{D} = \mathbf{H} \times \mathbf{DI},\ H_{ji} = h(t_j - s_i),\ j=1...j_{\max}. \tag{9}$$

Первые две особенности матрицы **H** связаны с определением передаточной функции $h(t)$ формулой (2). Первая особенность заключается в том, что $h(t) = 0,\ t < 0,$ из чего следует, что матрица **H** является нижней треугольной матрицей. Вторая особенность обуславливается равенством $h(0) = h(t_j - s_i), i = j,\ i, j = 1,..., j_{\max}$, отсюда вытекает равенство $H_{j\,j} = a_f + a_s$, что существенно упрощает процесс имитации искажения исходного цифрового сигнала и решения уравнения (9) относительно **DI**. Третья особенность вытекает непосредственно из характера функции $h(t)$ и соотношения временных параметров процесса высвечивания в сцинтилляторе и времени интегрирования Δt:

$$h'(t) < 0;\ \ \tau_f < \tau_s << t_{\max},\ \Delta t << \tau_s,\ \Delta t < \tau_f. \tag{10}$$

Если условие $\Delta t < \tau_f$ не выполняется, то процесс высвечивания можно описать одной экспоненциальной функцией.

Из третьей особенности вытекает существование некоторого момента времени $t_{\lim}$, $t_{\lim} << t_{\max}$, начиная с которого можно считать, что $h(t) = 0$. Пусть в момент времени t_0 наблюдается идеальный цифровой сигнал DI_{t_0}. В качестве уравнения нахождения момента времени $t_{\lim}$, отсчитываемого от t_0, может быть предложено следующее соотношение:

$$D(t_{\lim}) \approx \left[DI_{t_0} \left(a_f \exp\left(-t_{\lim}/\tau_f\right) + a_s \exp\left(-t_{\lim}/\tau_s\right) \right) \right] = \varepsilon, \tag{11}$$

где ε — уровень, при котором искажение незначимо. Для цифровых сигналов можно взять, например, $\varepsilon = 1$.

Из (11) следует, что значение $t_{\lim}$ зависит не только от амплитудных и временных параметров высвечивания сцинтиллятора τ_f, a_f, τ_s, a_s, но и амплитуды идеального цифрового сигнала DI_{t_0}, вызывающего искажение.

Для цифровых сигналов аналогом параметра $t_{\lim}$ является параметр $j_{\lim}$. Данный параметр ограничивает суммирование в (8) условием

$$j - i \le j_{\lim}. \tag{12}$$

Из свойств функции $h(t)$ вытекает особенность матрицы **H** — она является нижнетреугольной:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_0^* & 0 & 0 & 0 & ... \\ H_1^* & H_0^* & 0 & 0 & ... \\ H_2^* & H_1^* & H_0^* & 0 & ... \\ H_4^* & H_3^* & H_1^* & H_0^* & ... \\ ... & ... & ... & ... & ... \end{pmatrix}, \tag{13}$$

где $H_k^* = h(k \cdot \Delta t),\ k = 0, ... , j_{\max} - 1$.

Особенность матрицы (13) сводится к тому, что она полностью определяется одним вектором $\mathbf{H}^*$, что существенно упрощает алгоритм восстановления исходного цифрового сигнала и позволяет реализовать алгоритм обратной свертки.

2.2. Алгоритм восстановления сигнала

Будем считать, что известны параметры, характеризующие сцинтиллятор: τ_f, a_f, τ_s, a_s. Это означает, что передаточная функция $h(t)$ полностью определена.

На вход алгоритма поступает дискретизированный цифровой сигнал **D**, являющийся строкой цифрового изображения.

Сделаем несколько предварительных замечаний для построения алгоритма восстановления. Пусть до момента времени t_0 светового потока на входе фотоприемника не наблюдалось, то есть источник излучения был выключен либо полностью экранирован. С моментом времени t_0 связывается появление и регистрация ионизирующего излучения, t_0 соотносится с j_0 элементом вектора **D**. Очевидно, что во все элементы сигнала **D**, начиная с номера $j_0 + 1$ и заканчивая $j_0 + j_{\lim}$, сцинтиллятором вносятся значимые вклады от исходного сигнала, т.е. сигнала DI_{j_0}. Согласно (5) и (8), восстановленный сигнал в точке j_0 находится по формуле:

$$R^*_{j_0} \approx \frac{D_{j_0}\Delta t}{a_f + a_s} = \frac{D_{j_0}\Delta t}{H^*_0}. \tag{14}$$

Откорректируем искажение, вносимое сигналом в элементе j_0 в последующие элементы:

$$D^*_j = D_j - R^*_{j_0}\left(a_f \exp\left(-\frac{t_j - t_{j_0}}{\tau_f}\right) + a_s \exp\left(-\frac{t_j - t_{j_0}}{\tau_s}\right)\right)\Delta t = D_j - R^*_{j_0} H^*_{j-j_0}, j = j_0 + 1, \dots, j_0 + j_{\lim}. \tag{15}$$

Корректировка продолжается до элемента с номером $j_0 + j_{\lim}$, вклад в который меньше заданного заранее значения ε (см. (11)).

Если выполняется условие

$$D^*_{j_0+1} > \varepsilon, \tag{16}$$

то формула для вычисления значения восстановленного сигнала в элементе с номером $j_0 + 1$ имеет вид:

$$R^*_{j_0+1} \approx \frac{D^*_{j_0+1}\Delta t}{H^*_0}. \tag{17}$$

По формуле, аналогичной (15), находим искажения, вносимые в элементы частично откорректированного сигнала, последующие за элементом $j_0 = 1$, вплоть до элемента с номером $j_0 + 1 + j_{\lim}$. Следует отметить, что анализируется уже откорректированный сигнал со своим значением $j_{\lim}$.

Если (16) не выполняется, т.е. $D^*_{j_0+1} \le \varepsilon$, то осуществляется поиск дальнейшего по шкале времени ненулевого значения сигнала.

Описанная процедура восстановления продолжается вплоть до достижения последнего элемента цифрового сигнала.

Алгоритм, базирующийся на вышесказанных замечаниях и формулах (14)—(17), представляет собой обратный ход в методе Гаусса решения системы линейных алгебраических уравнений (9).

Следует отметить, что формально в описанном алгоритме будет фигурировать не вся матрица **H** (9), а только ее левый верхний минор **A** — $j_{\lim}$ строк и $j_{\lim}$ столбцов. Для такой матрицы **A** существует и матрица $\mathbf{A}^{-1}$. Причем матрица $\mathbf{A}^{-1}$ обладает свойством (13), т.е. определяется первым столбцом $\mathbf{B} = \left(\mathbf{A}^{-1}\right)^{\langle 1\rangle}$.

Описанное свойство на практике существенно упрощает процесс восстановления исходного сигнала, сводя его к использованию обратной свертки (фильтра), где в качестве фильтра **F** выступает вектор-матрица **B** с необходимой корректировкой:

$$F_j = \frac{B_j}{\sum_{i=1}^{j_{\lim}} B_i}, \; j = 1 \dots j_{\lim}. \tag{18}$$

Формула для оценки восстановленного сигнала $\mathbf{DI}^*$ в этом случае имеет вид:

$$DI^*_j = \begin{cases} 0, & t_j < 0 \vee t_j > t_{\max} \\ \left[\sum_{i=0}^{j} D_i \cdot \begin{cases} F_{j-i}, & j - i \le j_{\lim} \\ 0, & j - i > j_{\lim} \end{cases}\right] \end{cases}. \tag{19}$$

Алгоритм, базирующийся на преобразовании (19), отличается высокой точностью и производительностью. При малых значениях Δt остаточное отклонение восстановленного сигнала от исходного сигнала мало, что следует из положений, использованных при построении алгоритма.

Представленный выше алгоритм базируется на информации о параметрах сцинтиллятора τ_f, τ_s, a_f, a_s. Имеющиеся в научной литературе данные по этим параметрам могут сильно отличаться друг от друга. Отсюда вытекает необходимость оценки τ_f, τ_s, a_f, a_s непосредственно в ходе физического эксперимента либо в процессе формирования цифровых радиографических изображений. Ниже обсудим возможные подходы к определению параметров сцинтиллятора τ_f, τ_s, a_f, a_s.

3. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОЙ И МЕДЛЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЫСВЕЧИВАНИЯ В СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ

3.1. Предпосылки разработки алгоритма

Существует физический фактор, позволяющий разработать высокоточный и высокопроизводительный алгоритм оценки временных и амплитудных параметров сцинтилляторов непосредственно в результате физического эксперимента. Упомянутый фактор связан с тем, что временные параметры быстрой τ_f и медленной τ_s составляющих процесса высвечивания в сцинтилляционном детекторе, как правило, существенно отличаются друг от друга [22, 23], т.е. $\tau_f << \tau_s$.

Для оценки искомых параметров сцинтиллятора необходимо использовать специальным образом организованные сигналы, например, ультракороткий или прямоугольный сигналы с высокой амплитудой на нулевом фоне [4]. Для ультракороткого импульса его длительность t_{imp} должна быть существенно меньше τ_f, а время измерения Δt — много меньше t_{imp}. Ультракороткий импульс достаточно сложно физически реализуем. Прямоугольный высокоамплитудный импульс может быть реализован с помощью сканирования металлической пластины с прорезанной щелью, причем толщина пластины должна превышать проникающую способность для исследуемой максимальной энергии рентгеновского излучения. При этом можно использовать достаточно широкую щель. Предполагается, что информативной частью окажется убывающая часть цифрового сигнала.

3.2. Аналитическое обоснование алгоритма

Пусть идеальный сигнал $I(t)$ представляет собой прямоугольный высокоамплитудный импульс, описываемый выражением:

$$I(t) = I_0 \begin{cases} 1, \; t_0 \le t \le t_0 + t_{imp} \\ 0, \; (t < t_0) \vee (t_0 + t_{imp} < t < t_{\max}) \end{cases}, \tag{20}$$

где t_0, t_{imp} — момент прихода и длительность импульса; $t_{\max}$ — длительность сигнала.

После подстановки (20) в (5) и отсчета времени от t_0 получим:

$$J(t) = C_E I_0 \cdot \begin{cases} \int\limits_0^t \left(a_f \exp\left(-(t-p)/\tau_f\right) + a_s \exp\left(-(t-p)/\tau_s\right)\right) \mathrm{d}\, p, \quad 0 < t \le t_{imp} \\ \int\limits_0^{t_{imp}} \left(a_f \exp\left(-(t-p)/\tau_f\right) + a_s \exp\left(-(t-p)/\tau_s\right)\right) \mathrm{d}\, p, \; t_{imp} < t < t_{\max} - t_0 \end{cases}. \tag{21}$$

Введем переменную $x = t - t_{imp}$ и перепишем вторую часть сигнала $J_a(t)$, т.е. сигнал для $t > t_{imp}$, в следующем виде:

$$W(x) = \frac{J_a(x)}{J_a(x=0)} = \frac{C_E I_0 \left(k_f \cdot \exp\left(-x/\tau_f\right) + k_s \exp\left(-x/\tau_s\right)\right)}{J_a(x=0)}, \tag{22}$$

где k_f, k_s — коэффициенты для быстрой и медленной составляющих высвечивания, не зависящие от времени t. Формулы для вычисления k_f и k_s имеют вид:

$$k_f = a_f \int\limits_0^{t_{imp}} \exp\left(-x/\tau_f\right) \mathrm{d}\, p, \; k_s = a_s \int\limits_0^{t_{imp}} \exp\left(-x/\tau_s\right) \mathrm{d}\, p. \tag{23}$$

Заметим, что в соответствии с организацией тестового прямоугольного сигнала в ближней области к импульсу заметно влияние быстрой составляющей, а в дальней — только медленной.

За основу для разработки алгоритма оценки временных и амплитудных параметров сцинтиллятора выберем выражение (22) с коэффициентами (23).

3.3. Этапы алгоритма оценки параметров сцинтиллятора

На вход алгоритма поступает цифровой сигнал **D**. Известны следующие параметры схемы контроля: время интегрирования Δt; скорость сканирования V; ширина щели, формирующей тестовый цифровой сигнал L; уровень цифрового сигнала при измерениях без объекта контроля D_0. Ожидаемая длительность импульса t_{imp} оценивается исходя из ширины щели L и скорости сканирования V: $t_{imp} = L/V$. Альтернативой формированию цифрового сигнала щелью может быть его формирование при оптимальном устойчивом режиме работы рентгеновского аппарата и выключением его (рентгеновского аппарата) через строго заданный промежуток времени t_{imp} [4]. В обеих вариантах формирования тестовых прямоугольных сигналов ожидаемое или заданное значения t_{imp} и D_0 корректируются экспериментально.

Обсудим этапы алгоритма.

1. Находим участок изменения координаты j от j_1 до j_2, на котором значения сигнала **D** близки к константе (максимуму) и начиная $j = j_2 + 1$ элементы сигнала убывают. Формула для нахождения откорректированного значения сигнала D_0 имеет вид:

$$D_0 = \frac{\sum_{j=j_1}^{j_2} D_j}{j_2 - j_1}. \tag{24}$$

Значение $j = j_2$ соответствует $t_{j_2} = t_{imp}$.

2. Определяем значение $j, j = j_3$ по экспериментальному представлению формулы (11):

$$D_{j_3} = \min\left\{ j,\ j_2 < j \le j_{\max} \middle| D_j = \varepsilon \right\}. \tag{25}$$

3. Формируем экспериментальную дискретизацию функции затухания W_0, W_1,.., $W_{i_{\lim}}$ с помощью выражения:

$$W_i = \frac{D_{i+j_2}}{D_0},\ i = 0, \dots, i_{\lim},\ i_{\lim} = j_3 - j_2. \tag{26}$$

4. Значения элементов вектора **W** прологарифмируем:

$$LW_i = \ln W_i,\ i = 0, \dots, i_{\lim}. \tag{27}$$

5. Находим координату i_L, $0 < i < i_{\lim}$, для которой линия, соединяющая точки $\left(i_L, \ln D_{i_L}\right)$ и $\left(i_{\lim}, \ln D_{i_{\lim}}\right)$, близка к прямой. Координата i_L находится движением от точки $i_{\lim}$ в сторону уменьшения с подсчетом текущих параметров линии методом наименьших квадратов. Если сигнал в точке i_3 достаточно близок к нулю, то координата i уменьшается до некоторого значения $i = i_3^*$, начиная с которого цифровой сигнал начинает возрастать при уменьшении i. После уменьшения значение координаты i на несколько точек вычисляются текущие параметры линии и величина невязки Δ, отнесенная к общему числу точек n, вовлеченных в процедуру обработки. Процедура вычислений прерывается в точке $i = i_2^*$, если отношение Δ/n, начиная с этой точки, начинает резко и монотонно возрастать.

6. В соответствии с подходом, отмеченным выше, на интервале j_2^*, j_3^* находятся параметры медленной составляющей — a_s и τ_s.

Для этого реализуем несколько шагов.

Введем функцию:

$$Flin(x, a, b) = -ax + b. \tag{28}$$

Зададим минимизируемую функцию:

$$Fs(a, b) = \sum_{i=i_2^*}^{i_3^*} \left(Flin\left(\left(i - i_2^* \right) \Delta t, a, b \right) - LW_i \right)^2. \tag{29}$$

Введем начальные значения a и b, а затем найдем минимальное значение функции $Fs(a,b)$ по параметрам a и b. Функция $Fs(a,b)$ достигает минимум для значений параметров $a = as,\ b = bs$, если выполняется равенство:

$$\min_{a,b} Fs(a,b) = Fs(as,bs). \tag{30}$$

Искомые параметры τ_s, a_s находятся по формулам:

$$\tau_s = \frac{1}{as}, \quad a_s = \frac{\exp(bs)}{\int\limits_0^{t_{imp}} \exp\left(-x/\tau_s\right) \mathrm{d}\, p}. \tag{31}$$

7. Оценивается вклад быстрой составляющей в цифровой сигнал:

$$Df_i = D_i - a_s \times \exp\left(-\frac{\left(i - i_2\right)\Delta t}{\tau_s}\right), i = i_2, \ldots, i_2^*. \tag{32}$$

8. По аналогии с пунктом 3 формируем экспериментальную дискретизацию функции затухания для быстрой составляющей Wf_0, Wf_1, ... , $Wf_{i_2^*}$ с помощью выражения:

$$Wf_i = Df_i / Df_0, \; i = 0, \ldots, i_2^*. \tag{33}$$

9. Значения элементов вектора **Wf** прологарифмируем:

$$LWf_i = \ln Wf_i, \; i = 0, \ldots, i_2^*. \tag{34}$$

10. Для нахождения соответствующего участка $i_2, \ldots, i_2^{**}$, $i_2^{**} < i_2^*$ и для оценки параметров a_f и τ_f воспользуемся подходом, описанным в пунктах 3—5, с той лишь разницей, что координата i не уменьшается, а увеличивается, и анализируется сигнал **Df**.

11. На интервале j_2, j_2^{**} находятся параметры медленной составляющей — a_s и τ_s.

Для этого воспользуемся введенной ранее функцией (28).

Аналогично (29) зададим минимизируемую функцию:

$$Ff(a,b) = \sum_{i=0}^{i_2^{**}} \left(Flin\left(\left(i - i_2^*\right)\Delta t, a, b\right) - LWf_i \right)^2. \tag{35}$$

Введем начальные значения a и b, а затем найдем минимальное значение функции $Ff(a,b)$ по параметрам a и b. Функция $Ff(a,b)$ минимальна для значений параметров $a = af$, $b = bf$, если выполняется равенство:

$$\min_{a,b} Ff(a,b) = Ff(af, bf). \tag{36}$$

Параметры быстрой составляющей высвечивания τ_f, a_f находятся по формуле, аналогичной (31):

$$\tau_f = \frac{1}{af}, a_f = \exp(bf) \Big/ \int\limits_0^{t_{imp}} \exp\left(-x/\tau_f\right) \mathrm{d}\, p. \tag{37}$$

Предложенный алгоритм реализован в системе для математических вычислений MathCad.

Отметим, что поиск линейных участков может быть осуществлен и на основе визуального анализа соответствующих участков графиков.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для апробации предложенных выше алгоритмов восстановления сигнала после сцинтилляционного детектора и оценки амплитудных и временных параметров быстрой и медленной составляющих затухания сигнала в сцинтилляционном детекторе был проведен ряд вычислительных экспериментов. В качестве сцинтиллятора был выбран GSO. Для данного материала в [23] приведены следующие значения временных параметров: τ_f = 65,2 нс; τ_s = 605,8 нс и соответствующий вклад в интегральную интенсивность I_f = 86 %, I_s = 14 %. В соответствии с (5), значения амплитудных параметров a_f и a_s равны $6{,}104 \times 10^6$ и $9{,}937 \times 10^5$ соответственно.

Сигнал со сцинтилляционного детектора оцифровывался АЦП с разрядностью k_{ADC} = 16. Время регистрации Δt = 25 нс. Коэффициент защиты цифрового сигнала от превышения максимального значения C_{ADC} = 0,8. Для этих данных D_0 = 52428.

В табл. 1 приведены результаты расчетов по формуле (11) отношения $t_{lim}/\Delta t$ в целых числах для приведенных выше условий и диапазона изменения ε от 1 до 10. Отмеченное отношение является количеством элементов j_{lim} фильтра **F** в обратной свертке (19) для D_0 = 52428. Для обоснования необходимости использования фильтра с высоким количеством элементов в обратной свертке в табл. 1 также указаны отношения t_{lim}/τ_s.

Таблица 1

Результаты расчетов отношения $t_{lim}/\Delta t$ (11) для D_0 = 52428

ε	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{lim}/\Delta t$	269	246	240	233	223	218	215	210	208	205
t_{lim}/τ_s	8,87	8,12	7,93	7,69	7,37	7,2	7,1	6,93	6,88	6,78

Приведенные в табл. 1 данные свидетельствуют о необходимости учета медленной компоненты процесса высвечивания энергии фотонов, поглощенных в сцинтилляционном детекторе.

4.1. Результаты восстановления сигнала после сцинтилляционного детектора

Выбор исходного сигнала для тестирования алгоритма восстановления сигнала после сцинтиллятора зависит от задач, стоящих перед системами ЦР и РКТ. В качестве обязательных требований к такого рода сигналам можно придерживаться требования перекрытия возможного диапазона изменения сигнала и необходимости обнаружения локальных сигналов малого контраста [16, 17, 24].

В качестве объектов для симулирования искажений, вносимых сцинтиллятором в исходный сигнал, были выбраны ступенчатые и клиновидные объекты с локальным включениями в форме кубовидных пор. При моделировании исходных объектов придерживались подхода, изложенного в работах [16, 17].

Отметим, что информативному сигналу предшествовало полное экранирование и часть сигнала, необходимая для калибровки по белому.

На рис. 1 приведены идеальные сигналы, их искажения сцинтилляционным детектором и результаты реконструкции для клиновидных и ступенчатых сигналов. Тестовые объекты содержали также кубические поры размером около 5 % от толщины объекта в месте локализации.

Из сравнения идеальных сигналов на рис. 1*а* с сигналами, искаженными сцинтилляционным детектором на рис. 1*б*, можно сделать вывод о значимом искажении сигналов детектором, особенно для участков с резким перепадом сигналов. Наличие малоконтрастных локальных неоднородностей по искаженным сигналам подтверждается, но сделать корректное заключение о форме этих неоднородностей затруднительно. Восстановленные сигналы близки к исходным, незначительные остаточные искажения при реконструкции наблюдаются в местах с резким и значительным изменением амплитуды сигналов.

4.2. Результаты оценки параметров быстрой и медленной составляющих высвечивания сцинтиллятора

В алгоритме оценки параметров быстрой и медленной составляющих высвечивания сцинтилляционного детектора отмечена необходимость исследования затухающей части высокоамплитудных прямоугольных сигналов. Анализ данных, приведенных на рис. 1, подтверждает существование выраженной ниспадающей части сигнала.

На рис. 2 приведено изображение прямоугольного сигнала, искаженного сцинтилляционным детектором. При симуляции использовались параметры из предыдущего пункта, исключение Δt = 10 нм. Сигнал зашумлен мультипликативным шумом (распределение Гаусса, σ = 0,01).

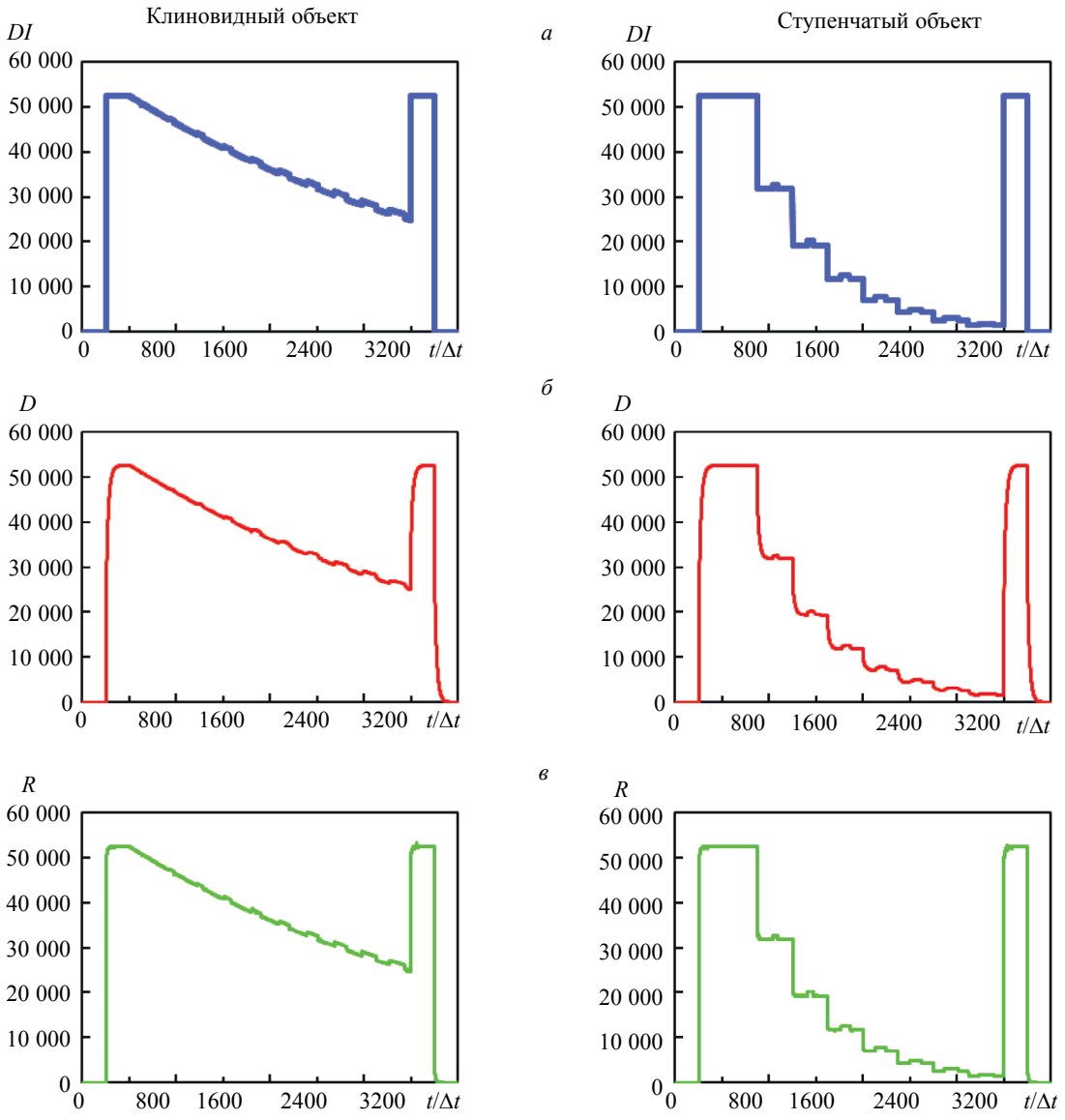

Рис. 1. Сравнение сигналов для клиновидного и ступенчатого объектов:
а — идеальные сигналы; *б* — сигналы, искаженные сцинтилляционным детектором; *в* — восстановленные сигналы.

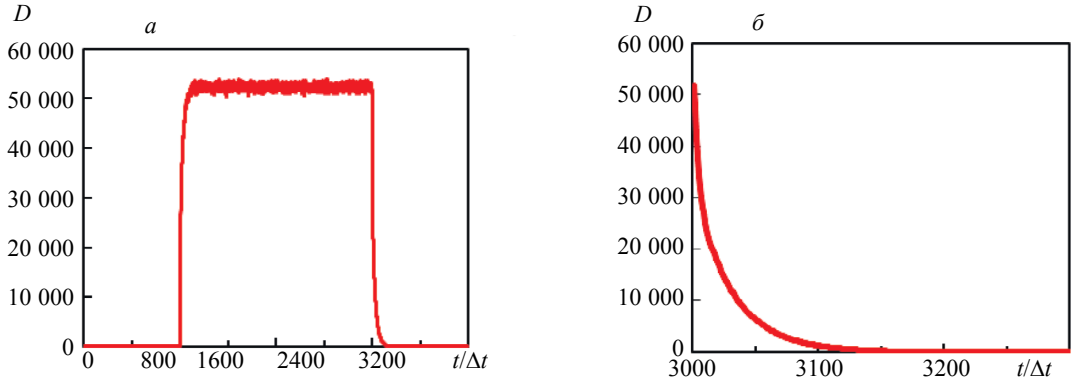

Рис. 2. Изображение прямоугольного сигнала, искаженного сцинтилляционным детектором, (*а*) и трансформация идеального сигнала (*б*).

С целью иллюстрации возможности применения исследуемого алгоритма на рис. 2 продемонстрирована затухающая часть сигнала.

Из визуального анализа ниспадающей части искаженного сцинтиллятором сигнала можно сделать вывод о возможности использования этой информации для оценки параметров быстрой и медленной составляющих высвечивания.

Для проверки качества алгоритма оценки временных параметров был проведена серия вычислительных экспериментов по моделированию процесса трансформации идеального сигнала сцинтилляционным детектором с последующей оценкой временных параметров для быстрой τ_f и медленной τ_s составляющих процесса высвечивания сцинтилляций. При этом варьировались уровни шумов сигналов $D(t)$.

В табл. 2 приведена зависимость оценок параметров τ_f и τ_s от уровней относительных шумов δ.

Таблица 2

Оценки параметров τ_f и τ_s от уровней относительных шумов δ

Параметры	Исходные	δ, %						
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
a_f	$6{,}104\times10^6$	$6{,}104\times10^6$	$6{,}094\times10^6$	$6{,}104\times10^6$	$6{,}105\times10^6$	$6{,}098\times10^6$	$6{,}078\times10^6$	$6{,}134\times10^6$
τ_f, нс	65,2	65,2	64,8	64,6	64,8	64,8	64,8	64,7
a_s	$9{,}937\times10^5$	$9{,}937\times10^5$	$9{,}957\times10^5$	$9{,}972\times10^5$	$9{,}958\times10^5$	$9{,}951\times10^5$	$9{,}947\times10^5$	$9{,}990\times10^5$
τ_s, нс	605,8	605,8	605,4	605,3	605,4	605,4	605,4	605,3

Из анализа данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод о достаточно высокой устойчивости предлагаемого алгоритма оценки параметров τ_f и τ_s к шумам. Оценки погрешности исследуемых параметров близки к экспериментальным погрешностям измерения τ_f и τ_s, указанным в [23]. Вероятнее всего высокий уровень оценки погрешности τ_f по сравнению с погрешностью τ_s обусловлен для рассматриваемого примера ограниченностью интервала времени, по которому и оценивался параметр быстрой составляющей. Очевидно, что с увеличением времени измерения точность оценки параметров быстрой составляющей высвечивания и чувствительность к шумам будет резко возрастать.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

5.1. Общие замечания

Для нахождения параметров B_f и τ_f может быть использована начальная часть цифрового сигнала, соответствующая анализируемому импульсу. В этом случае медленная составляющая должна быть откорректирована.

Отметим, что методы многопараметрической минимизации (четыре параметра) недостаточно эффективны применительно к рассматриваемой задаче по сравнению с предлагаемым алгоритмом, который отличается простой, ясностью и легкостью программной реализации.

Разумеется, что качество алгоритмов, предложенных в разделах 2 и 3, определяется помимо параметров сцинтиллятора также формой и длительностью сигналов, амплитудами и уровнями шумов цифровых сигналов, вдобавок временем измерения (интегрирования) Δt.

Заметим, что коррекция послесвечения применительно к системам ЦР и РКТ должна быть осуществлена практически в любых случаях, за исключением использования сверхбыстрых сцинтилляторов и контроля объектов без резких перепадов по толщине в длинах свободного пробега.

Предложенные выше алгоритмы реализованы в системе для математических вычислений MathCad. Данный выбор обусловлен максимальной близостью языков математики и MathCad [16, 17]. Программы, написанные в системе MathCad, отличаются понятностью, адаптивностью и простотой отладки.

Разработанные алгоритмы и программы их реализующие естественным образом объединяются с существующими математическими и имитационными моделями систем цифровой радиографии [16, 17] и рентгеновской компьютерной томографии [25].

Существует ряд вопросов, связанных с рассматриваемыми задачами, для решения которых можно применить разработанные алгоритмы. Остановимся подробнее на одном из них.

5.2. Устойчивость алгоритма оценки параметров высвечивания

Выше изложен алгоритм оценки амплитудных и временных параметров быстрой и медленной составляющих высвечивания a_f, a_s, τ_f, τ_s. Одной из главных характеристик любой задачи измерений параметров является оценка устойчивости соответствующего алгоритма обработки информации.

Определим понятие устойчивости алгоритма применительно к рассматриваемой задаче. Пусть имеется вектор оцениваемых параметров $\mathbf{P} = \begin{pmatrix} a_f & \tau_f & a_s & \tau_s \end{pmatrix}$. В процессе измерений формируется информационный сигнал **D**, который также является вектором, но с существенно большей размерностью. Между векторами **P** и **D** существует связь, описываемая некоторым оператором **F**:

$$\mathbf{D} = \mathbf{F}(\mathbf{P}). \tag{30}$$

Алгоритм оценки амплитудных и временных параметров высвечивания реализует оператор $\overline{\mathbf{F}}^{-1}$, который близок к обратному оператору $\mathbf{F}^{-1}$. В результате реализации алгоритма применительно к экспериментальным данным получим преобразование:

$$\mathbf{P}^* = \overline{\mathbf{F}}^{-1}(\mathbf{D}) = \overline{\mathbf{F}}^{-1}(\mathbf{F}(\mathbf{P})). \tag{31}$$

В формуле (31) вектор $\mathbf{P}^*$ — это вектор оценок исследуемых параметров высвечивания $\begin{pmatrix} a_{\grave{a}}^* & \tau_f^* & a_s^* & \tau_s^* \end{pmatrix}$.

Понятие устойчивости алгоритма связывают с его реакцией на малые возмущения исходных данных [21]. Применительно к рассматриваемой задаче можно принять, что алгоритм определения параметра p называется устойчивым, если малое приращение значения исходного параметра Δp приводит к малому приращению оценки исследуемого параметра Δp^* и выполняется условие:

$$\Delta p^* / \Delta p \approx 1. \tag{32}$$

На практике предпочтительным является проведение исследований при вариации параметров в относительных величинах, поэтому (32) трансформируется в ограничение:

$$\delta p^* / \delta p \approx 1. \tag{33}$$

Проведение исследование устойчивости алгоритма для всей совокупности сцинтилляторов в рамках одной статьи не представляется возможным и в этом нет особой необходимости. Проанализируем устойчивость для приведенного в пункте 4.2 примера.

Результаты моделирования показали близость рассматриваемого отношения для всех информативных параметров к единице при изменении параметров до 10 и более процентов. Это связано с тем, что для уровней шумов в исходных сигналах близких к нулю автоподстройка алгоритма устремляет систематическую погрешность оценки исследуемых параметров к нулю. Расхождение же связано исключительно с цифровым эквивалентом единицы и смещением реального и ожидаемого времени положения максимума для прямоугольного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена математическая модель искажения исходного радиометрического сигнала сцинтилляционным детектором для случая регистрации непрерывного рентгеновского излучения. Модель учитывает распределение интенсивности излучения по аналоговому сигналу, время регистрации излучения, временные и амплитудные параметры быстрой и медленной составляющих процесса высвечивания в сцинтилляционном детекторе. Разработан способ восстановления сигнала после сцинтиллятора, основанный на предварительной информации о параметрах сцинтилляционного детектора. Предложен алгоритм оценки амплитудных и временных параметров быстрой и медленной составляющих процесса высвечивания в сцинтилляционном детекто-

ре. Проведена серия вычислительных экспериментов и на основе анализа ее результатов продемонстрирована эффективность разработанных алгоритмов. Разработанные алгоритмы восстановления сигналов, искаженных сцинтилляционным детектором, и оценки параметров быстрой и медленной составляющих процесса высвечивания могут быть усовершенствованы в части детального описания начального этапа высвечивания и представления затухания суммой из трех и более экспоненциальных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kumar V., Luo Z.* A review on x-ray excited emission decay dynamics in inorganic scintillator materials // Photonics. 2021. V. 8. No. 3. No. article 71. https://doi.org/10.3390/photonics8030071

2. *Lu L., Sun M., Wu T., Lu Q., Chen B., Huang B.* All-inorganic perovskite nanocrystals: new generation scintillators for high-resolution X-ray imaging // Nanoscale Advances. 2022. V. 4. P. 680—696. https://doi.org/10.1039/D1NA00815C

3. *Yasar F., Kilin M., Dehdashti S., Yu Z., Ma Z., Wang Z.* Spatially resolved x-ray detection with photonic crystal scintillators // Journal of Applied Physics. 2021. V. 130. No. 4. No. article 043101. https://doi.org/10.1063/5.0050380

4. *Nagarkar V.V., Vasile S., Gothoskar P., Gordon J.S., Gupta T.K.* CCD based high resolution non-destructive testing system for industrial applications // Applied Radiation and Isotopes. 1997. V. 48. No. 10—12. P. 1459—1465. https://doi.org/10.1016/S0969-8043(97)00141-3

5. *Panetta D.* Advances in X-ray detectors for clinical and preclinical Computed Tomography // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. V. 809. P. 2—12. https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.10.034

6. *Eilbert R.F.* X-ray technologies // Aspects of explosives detection. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 89—130. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374533-0.00006-4

7. *Foster C., Wu Y., Stand L., Koschan M., Melcher C.L.* Effect of lithium codopant concentration on the luminescence properties of (Lu0. 75Y0. 25) 3Al5O12: Pr3+ single crystals: Before and after air annealing // Journal of Luminescence. 2019. V. 216. No. article 116751. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116751

8. *Marshall M.S., Kenesei P., Marton Z., Sosa C., Brecher C., Wart M., Miller S., Singh B., Miceli A., Nagarkar V.V.* Advances in high-resolution ultrafast LuI 3: Ce scintillators for fast timing applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2020. V. 67. No. 6. P. 969—973. https://doi.org/10.1109/TNS.2020.2985213

9 *Postupaev V.V.* High dynamic range measurement of CdWO4 afterglow // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2019. V. 923. P. 147—156. https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.090

10. *Van der Sar S.J., Brunner S.E., Schaart D.R.* Silicon photomultiplier-based scintillation detectors for photon-counting CT: A feasibility study // Medical Physics. 2021. V. 48. No. 10. P. 6324—6338. https://doi.org/10.1002/mp.14886

11. *Wang X., Dai Y., Zhang Z., Su L., Kou H., Wang Y., Wu A.* Optical and scintillation properties of Ce: $Y_3Al_5O_{12}$ single crystal fibers grown by laser heated pedestal growth method // Journal of Rare Earths. 2021. V. 39. No. 12. P. 1533—1539. https://doi.org/10.1016/j.jre.2021.06.008

12. *Chen S., Jiang B., Wang Y., Zhu Q., Yang Q., Ma W., Zang G., Zhang L.* Fabrication of Ce-doped (Gd_2Y) $Al_5O_{12}/Y_3Al_5O_{12}$ composite-phase scintillation ceramic // Journal of Rare Earths. 2019. V. 37. No. 9. P. 978—983. https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.01.001

13. *Nagorny S.* Novel Cs_2HfC_{l6} Crystal scintillator: recent progress and perspectives // Physics. 2021. V. 3. No. 2. P. 320—351. https://doi.org/10.3390/physics3020023

14. *Wu T., Wang L., Shi Y., Xu T., Wang H., Fang J., Ni. J., He H., Wang Ch., Wan B., Ding D., Zhou Zh. Liu Q., Li Q., Ju J., Huang X., Shichalin O., Papynov E.K.* Fast (Ce, Gd)$_3Ga_2Al_3O_{12}$ scintillators grown by the optical floating zone method // Crystal Growth & Design. 2021. V. 22. No. 1. P. 180—190. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.1c00779

15. *Behling R.* X-ray sources: 125 years of developments of this intriguing technology // Physica Medica. 2020. V. 79. P. 162—187. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.07.021

16. *Osipov S.P., Yadrenkin I.G., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Y.* Simulation modeling in digital radiography with allowance for spatial outlines of test objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 8. P. 647—660. https://doi.org/10.1134/S1061830920080082 [*Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачёв Е.Ю.* Имитационное моделирование в цифровой радиографии с учетом пространственных форм объектов контроля // Дефектоскопия. 2020. No. 8. С. 35—48.]

17. *Osipov S.P., Chakhlov S.V., Kairalapov D.U., Sirot'yan E.V.* Numerical modeling of radiographic images as the basis for correctly designing digital radiography systems of large-sized objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 2. P. 136—149. https://doi.org/10.1134/S1061830919020050 [*Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайролапов Д.У., Сиротьян Е.В.* Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. 2019. No. 2. С. 43—55.]

18. *Jaabar S.M., Hussain A.H.* A Move recent review of the integral equations and their applications // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. V. 1818. No. 1. No. article 012170. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1818/1/012170

19. *Karchevsky A.L.* Solution of the convolution type Volterra integral equations of the first kind by the quadrature-sum method // Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2020. V. 14. No. 3. P. 503—512. https://doi.org/10.1134/S1990478920030096

20. *Alvarez E., Lizama C.* Attractivity for functional Volterra integral equations of convolution type // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2016. V. 301. P. 230—240. https://doi.org/10.1016/j.cam.2016.01.048

21. *Lubich C.* Convolution quadrature revisited // BIT Numerical Mathematics. 2004. V. 44. No. 3. P. 503—514. https://doi.org/10.1023/B:BITN.0000046813.23911.2d

22. *Usui Y., Nakauchi D., Kawano N., Okada G., Kawaguchi N., Yanagida T.* Scintillation and optical properties of Sn-doped Ga_2O_3 single crystals // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2018. V. 117. P. 36—41. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.02.027

23. *Nassalski A., Kapusta M., Batsch T., Wolski D., Mockel D., Enghardt W., Moszynski M.* Comparative study of scintillators for PET/CT detectors / IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2005 // IEEE. 2005. V. 5. P. 2823—2829. https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2005.1596921

24. American national standard for determination of the imaging performance of X-ray and gamma-ray systems for cargo and vehicle security screening. Standard ANSI N42.46, 2008.

25. *Osipov S.P., Yadrenkin I.G., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu., Manushkin A.A.* Calculation model of X-ray computed tomography with density assessment function // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 3. P. 222—237. https://doi.org/10.1134/S1061830921030049. [*Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачёв Е.Ю., Манушкин А.А.* Вычислительная модель рентгеновской компьютерной томографии с функцией оценки плотности // Дефектоскопия. 2021. № 3. С. 37—52.]

УДК 620.179.14.2

СВЯЗЬ МАГНИТОУПРУГОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТОУПРУГОГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ 60Г И 65Г С КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛОЙ И МАГНИТОСТРИКЦИЕЙ

© 2022 г. В.Ф. Новиков[1,*], С.М. Кулак[1,], К.Р. Муратов[1,***], А.С. Парахин[1,****]**

[1]Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38

E-mail: [*]vitaly.nowikov2017@yandex.ru;[**]ksm-rabochi@rambler.ru; [***]muratows@mail.ru; [****]parahinas@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 12.02.2022; после доработки 15.04.2022
Принята к публикации 29.04.2022

Посвящается памяти нашего земляка академика Горкунова Эдуарда Степановича, начинавшего свою научную и педагогическую деятельность в индустриальном институте г. Тюмени. Эдуард Степанович был одним из инициаторов разрабатываемого в предлагаемой статье направления [1].

Проведены исследования магнитоупругого размагничивания сталей 60Г и 65Г после закалки и отпуска при их статическом и динамическом механическом напряжении. По результатам исследований определена магнитоупругая чувствительность к прикладываемым нагрузкам и ее зависимость от режима термообработки стали. Измерены магнитострикция и коэрцитивная сила сталей 60Г и 65Г. Установлена связь магнитоупругой чувствительности исследуемых сталей, уровня упругих напряжений с их коэрцитивной силой и магнитострикцией. Предложена методика оценки магнитострикции конструкционной стали по величине коэрцитивной силы и уровню магнитоупругого размагничивания при механическом воздействии на сталь. Полученные результаты могут способствовать повышению точности оценки упругих напряжений в стальной конструкции магнитоупругими методами.

Ключевые слова: магнитоупругое размагничивание, магнитострикция, смещение доменных границ, магнитное вращение магнитных моментов, ферромагнетик, упругие напряжения, ударное нагружение.

DOI: 10.31857/S0130308222060069; **EDN:** BNBGTA

ВВЕДЕНИЕ

Константы магнитострикции ферромагнитной стали определяются химическим составом и фазово-кристаллической структурой ферромагнетика. Положительная составляющая магнитострикции определяется пространственным распределением магнитных фаз и ее величина для одного и того же материала может иметь значение близкое к нулю или к константе в зависимости от ее текстуры [2—5]. Поэтому магнитострикция является самым структурно чувствительным магнитным параметром механических напряжений [6—10], пластической [11, 12], усталостной деформации [11—15] и уровня термомагнитной обработки. Она входит в формулу для магнитоупругой энергии и определяет магнитоупругие явления, в том числе магнитоупругую чувствительность коэрцитивной силы, остаточной намагниченности к напряжениям [11, 16, 17] и пьезомагнитный эффект остаточно намагниченного состояния [15]. Поэтому, несмотря на сложность ее измерения, изучение магнитострикции является актуальным.

Относительную чувствительность магнитоупругого материала можно характеризовать, как и у тензорезисторов, коэффициентом тензочувствительности [18]. Магнитоупругие свойства материала характеризуются также относительной магнитоупругой чувствительностью [19—21].

Применение магнитоупругих явлений в неразрушающем контроле слабо развито, так как их реализация предполагает воздействие на ферромагнетик не только магнитного поля, но и внешнего механического напряжения. В лабораторных условиях для отдельного образца стали его легко осуществить не только в одноосном, но и трехосном вариантах. Контролируемое нагружение конструкции и ее элементов возможно далеко не всегда. Однако локальную нагрузку можно осуществлять с помощью таких устройств силового воздействия как струбцина, домкрат и пружинный ударник [22—24]. При этом измеряется напряженность магнитного поля рассеяния локальной намагниченности и оценивается такой комплексный параметр, как магнитоупругая

чувствительность Λ остаточно намагниченного состояния стали (МУЧ), зависящая главным образом от ее магнитной жесткости и магнитострикции:

$$\Lambda = \frac{H_0 - H_\sigma}{H_0 \cdot \sigma} = \frac{\delta H}{\sigma}, \quad (1)$$

где H_0, H_σ – напряженность магнитного поля рассеяния локальной намагниченности стали до и после ее нагружения—разгружения соответственно; σ — амплитуда приложенных к стали механических напряжений.

Использование полевой зависимости магнитострикции для объяснения магнитоупругих явлений в низкоуглеродистой стали не всегда корректно, так как она является разностью двух составляющих магнитострикции: магнитострикции смещения и магнитострикции вращения [5, 11, 25]. Например, ноль на полевой кривой магнитострикции (рис. 1) значит лишь, что магнитострикция смещения скомпенсирована магнитострикцией вращения, и не факт, что магнитоупругая энергия при этом поле H равна нулю. Разделение на составляющие магнитострикции железа рассматривалось в работе [5] теоретически. В работе [11] использовали графический подход, а в исследованиях [25—27] — аппроксимирующую функцию Ланжевена.

Целью работы явилось исследование зависимости магнитоупругой чувствительности (МУЧ) магнитоупругого размагничивания сталей 60Г и 65Г от температуры отпуска и уровня упругих напряжений и ее связи с коэрцитивной силой и магнитострикцией смещения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Исследовали сталь 60Г в виде стандартных образцов для механических испытаний длиной 100 мм, диаметром рабочей части 10 мм и сталь 65Г в виде дисков диаметром 75 мм, толщиной 9,8 мм. Намагниченность M_r исследуемых сталей определяли по напряженности магнитного поля рассеяния $H \sim M_r$ феррозондовым магнитометром и микровеберметром Ф191, а коэрцитивную силу — по петле гистерезиса в полях 140 кА/м. Магнитострикцию измеряли мостовым методом в магнитном поле соленоида на образцах для механических испытаний (сталь 60Г) с помощью наклеиваемых тензорезисторов. Калибровку магнитострикции осуществляли на никелевом стандартном образце. В ходе проводимых исследований вычисляли магнитоупругую чувствительность стали 60Г к напряжениям осевого растяжения и стали 65Г к напряжениям локального сжатия после ударного воздействия. Образцы стали 60Г растягивались 10—30 раз в стенде на основе машины ЦД-20ПУ вдоль направления их намагничивания магнитным полем соленоида. Образцы из стали 65Г в виде дисков намагничивали путем многократных (до 10 раз) пропусканий импульсов тока через витки намагничивающей катушки диаметром 30 мм, располагаемой на их поверхности. В результате в образцах создавалась область локальной остаточной намагниченности (ЛОН). С помощью феррозондовых датчиков магнитного поля магнитометра ИКНМ-2ФП определяли в максимуме тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля рассеяния H_0 ЛОН. Создавались напряжения локального сжатия дисков вдоль нормали в центре ЛОН с помощью ударного воздействия на них, после чего снова измерялась напряженность H_σ магнитного поля рассеяния ЛОН. Величину магнитоупругой чувствительности Λ стали 65Г к напряжениям сжатия σ ударом рассчитывали по формуле (1). Ударное локальное нагружение разного уровня (пять раз), соосное с ним намагничивание дисков из стали 65Г и магнитные измерения проводили в устройстве, подробно описанном в работе [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полевая зависимость магнитострикции $\lambda_{эксп}(H)$ стали 60Г представлена на рис. 1. Согласно [5, 11, 25], она является суммой двух монотонных функций:

$$\lambda_{эксп}(H) = \lambda_{см}(H) + \lambda_{вр}(H), \quad (2)$$

где $\lambda_{см}(H)$ и $\lambda_{вр}(H)$ пропорциональны константам λ_{100} и λ_{111} соответственно.

В полях на порядок больших, чем коэрцитивная сила стали 60Г (200—4000 А/м), процессы смещения практически заканчиваются, магнитострикция смещения достигает насыщения и перестает вносить изменения в кривую экспериментальной магнитострикции. В этом случае

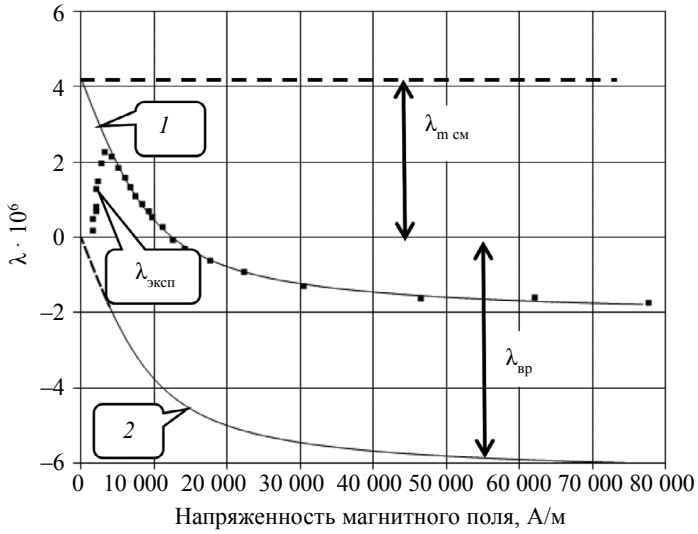

Рис. 1. Полевая зависимость (маркер ■) магнитострикции закаленной стали 60Г, отпущенной при 700 °С с аппроксимирующей функцией Ланжевена (*1*) и кривой $\lambda_{вр}$ (*2*).

зависимость $\lambda_{эксп}(H)$ (кривая маркера ■ на рис. 1) будет являться зависимостью $\lambda_{вр}(H)$ (кривая *2* на рис. 1) отрицательной составляющей магнитострикции, сдвинутой в вверх на величину $\lambda_{m\ см}$. Для ее описания в качестве аппроксимирующей использовалась функция Ланжевена (3) (кривая *1* на рис. 1) [25—27], которая, как видно из рис. 1, хорошо согласуется с экспериментом при следующих постоянных: C_1 = –6,2389 , C_2 = 4,0963, α_1 = 0,02355. Результат экстраполяции $\lambda_{m\ см} = 4{,}1\cdot10^{-6}$ и $\lambda_{вр} = -6{,}2\cdot10^{-6}$ при отклонении 0,013:

$$\lambda = C_1 L\left(\alpha_1 H\right) + C_2,$$
$$L\left(x\right) = \mathrm{cth}\left(x\right) - \frac{1}{x}. \qquad (3)$$

При $H = 0$ она начинается с координаты $\lambda_{m\ см}$, равной ~ $4\cdot10^{-6}$ (см. рис. 1). Кривая $\lambda_{вр}(H)$, сдвинутая вниз на $\lambda_{m\ см}$, т.е. в начало координат, будет представлять собой магнитострикцию вращения — отрицательную составляющую магнитострикции. В этом случае мы исключаем вклад в результирующую (экспериментальную) магнитострикцию процессов смещения.

Положительная составляющая магнитострикции смещения выразится кривой $\lambda_{см}(H) = \lambda_{эксп}(H) - \lambda_{вр}(H)$ для полей, обеспечивающих насыщение процессов смещения.

По результатам разложения экспериментальных кривых $\lambda_{эксп}(H)$ для стали 60Г в отпущенном состоянии были построены последовательно четыре зависимости (рис. 2): расчетного значения λ_m для наибольшего поля, положительных (пиковых) $\lambda_п$ значений магнитострикции в максимуме, отрицательных экспериментальных значений магнитострикции, в максимальном поле λ_s и отрицательной составляющей магнитострикции, полученной для тех же полей $\lambda_{вр}$ в зависимости от температуры отпуска закаленной стали 60Г (без учета размагничивающего фактора формы).

Видно, что составляющие λ_m и $\lambda_{вр}$ с ростом температуры отпуска стали увеличились по абсолютной величине в 8 раз. Темп роста магнитостикции λ_m и $\lambda_{вр}$ больше всего в диапазоне температур 300—400 °С. На рис. 3 показана зависимость намагниченности $M_{r\sigma}$ после приложения и снятия напряжений растяжения 25, 65, 130, 195, 325 МПа, а на рис. 4 — величины коэрцитивной силы H_c стали 60Г от температуры отпуска $T_{отп}$.

Величина намагниченности $M_{r\sigma}$ во всем температурном интервале отпуска изменилась в (4—20) раз, а H_c в 3,7 раз. На кривых $M_{r\sigma}(T_{отп})$ и $H_c(T_{отп})$ в диапазоне температур 450—550 °С наблюдается характерный пик этих величин. Он связан с выделением карбидов, дроблением доменной структуры и возникновением замыкающих доменов [28].

Изменение магнитоупругой чувствительности стали 60Г, определяемой вследствие пропорциональности $H \sim M_r$ соотношением $\Lambda = \left(M_{r0} - M_{r\sigma}\right)/\left(M_{r0}\cdot\sigma\right)$, показана на рис. 5. Видно, что ее монотонный рост прерывается резким скачком вниз в диапазоне температур 450—550 °С.

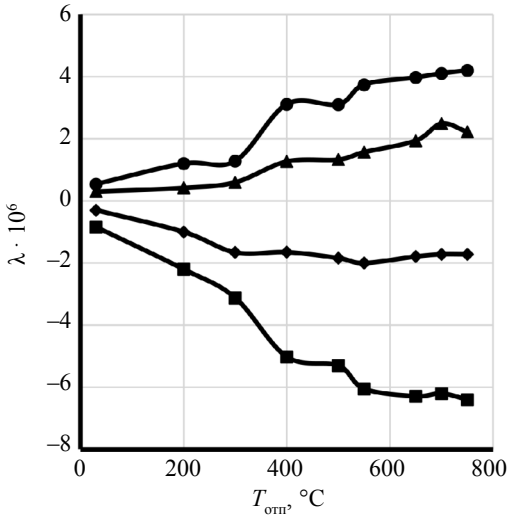

Рис. 2. Зависимость составляющих: $\lambda_{вр}$ (■), λ_s(♦), $\lambda_п$(▲), λ_m(●) магнитострикции стали 60Г от температуры $T_{отп}$ ее отпуска.

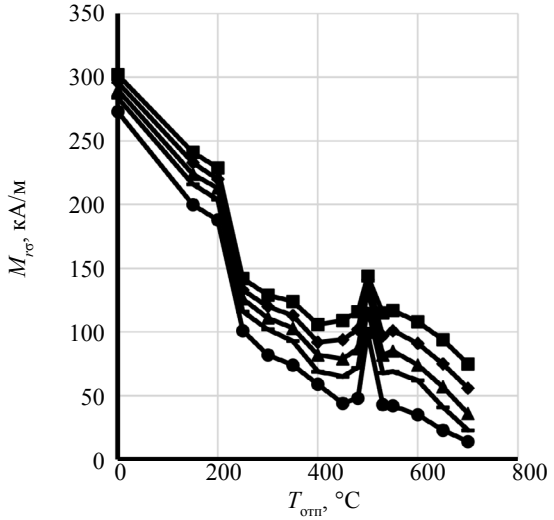

Рис. 3. Зависимость остаточной намагниченности $M_{rσ}$ стали 60Г после приложения—снятия напряжений растяжения σ: 25(■), 65(♦), 130(▲), 195(-), 325(●) МПа от температуры отпуска $T_{отп}$.

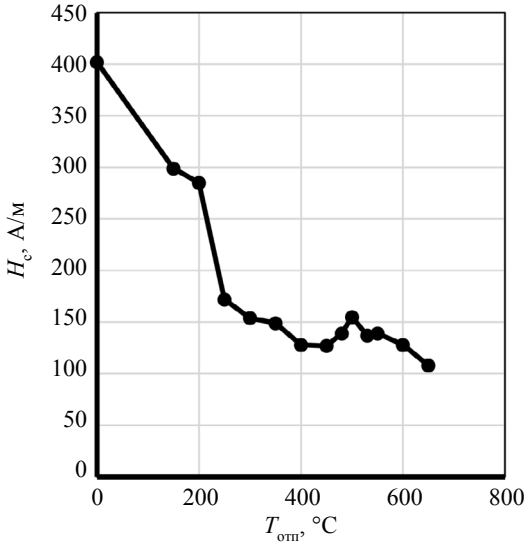

Рис. 4. Зависимость коэрцитивной силы H_c стали 60Г от температуры отпуска $T_{отп}$.

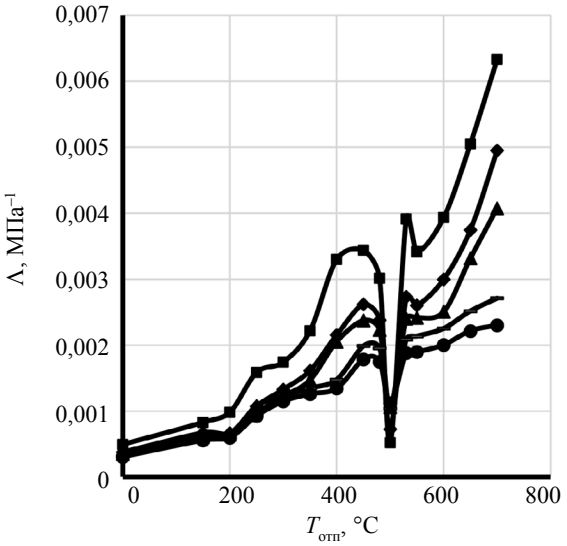

Рис. 5. Зависимость магнитоупругой чувствительности Λ стали 60Г от температуры отпуска $T_{отп}$ для напряжений σ: 25(■), 65(♦), 130(▲), 195(-), 325(●) МПа, создаваемых осевым растяжением.

Магнитоупругая чувствительность возросла в конечном результате в 7—12 раз, так же, как магнитострикция смещения (см. рис. 2). При используемом типе силового воздействия (нагружение—разгружение) размагничивание осуществляется в основном за счет процессов смещения, которое определяет гистерезис в сталях. Мы исходили из того, что гистерезис процессов вращения при используемых нагрузках и соответственно магнитоупругой энергии невелик и роль магнитострикции вращения практически не влияет на магнитоупругое размагничивание.

Практически, важно было выяснить, как изменяются магнитные и магнитоупругие параметры при переходе от остаточно намагниченного образца конечных размеров к локальной намагниченности (ЛОН), создаваемой импульсом тока катушки диаметром 30 мм на дисках диаметром 75 мм. Нагружение части локальной намагниченности осуществлялось ударом бойка диаметром 11 мм о поверхность стали. На рис. 6 и 7 показана зависимость напряженности магнитного поля рассеяния

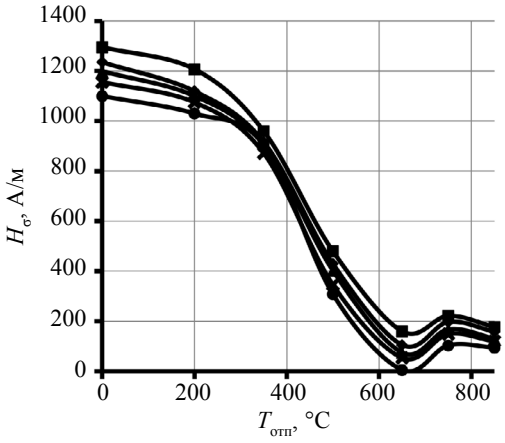

Рис. 6. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния H_σ ЛОН образца стали 65Г в виде диска после приложения напряжений σ ударами: 12 (■), 25 (♦), 38 (▲), 51(x) и 76 (●) МПа от температуры ее отпуска $T_{отп}$.

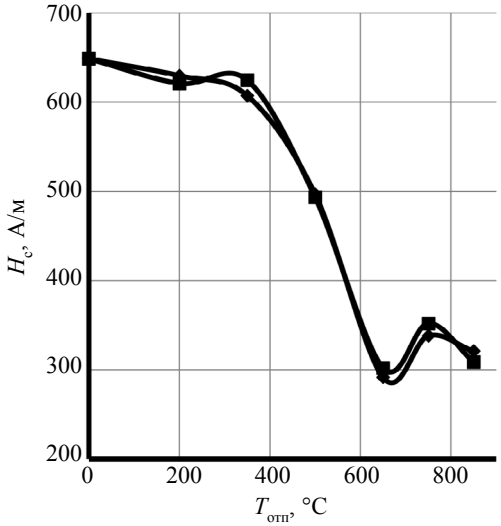

Рис. 7. Зависимость коэрцитивной силы H_c стали 65Г, измеренной в продольном (♦) и поперечном (■) направлениях, от температуры отпуска $T_{отп}$.

локальной намагниченности H_σ стали 65Г после воздействия ударными напряжениями 12, 25, 38,51 и 76 МПа и величины ее коэрцитивной силы H_c от температуры отпуска соответственно. Видно, что коэрцитивная сила закаленной стали 65Г в 1,6 раз больше, чем стали 60Г, напряженность поля H_σ больше в 4—4,2 раза.

Величина напряженности магнитного поля рассеяния H_σ ЛОН во всем температурном интервале отпуска изменилась в 10—11 раз, а H_c — в 2,1 раза. На кривых $H_\sigma(T_{отп})$ и $H_c(T_{отп})$ в диапазоне температур 650—775 °С так же наблюдается ярко выраженный пик этих величин, связанный с выделением карбидов, дроблением доменной структуры и возникновением замыкающих доменов. Магнитоупругая чувствительность Λ стали 65Г к ударным напряжениям в диапазоне температур до 200 °С не изменяется, затем резко увеличивается вплоть до 650 °С. В целом, МУЧ возросла в конечном результате в 7,6 раза (рис. 8).

Сопоставление магнитных и магнитоупругих свойств стандартных образцов из стали 60Г для механических испытаний (практически цилиндра) намагничиваемого целиком вдоль оси в магнитном поле соленоида, подвергаемого одноосным (однородным) растяжениям, и образцов из стали 65Г в форме дисков, намагничиваемых локально импульсом магнитного поля накладной катушки нормально к поверхности и нагружаемых сжимающим ударом, показывает, что исследуемые явле-

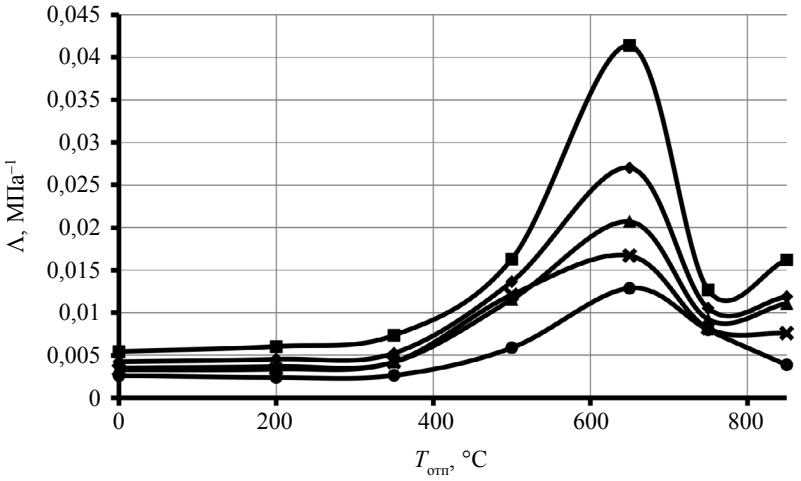

Рис. 8. Зависимость магнитоупругой чувствительности Λ дискового образца стали 65Г от температуры отпуска $T_{отп}$ при различных ударных напряжениях: 12(■), 25(♦), 39(▲), 51(**x**), 76(●) МПа.

ния не только качественно похожи: пропорциональность коэрцитивной силы H_c напряженности магнитного поля рассеяния H локальной намагниченности, но и близкие значения магнитоупругой чувствительности Λ к различным видам нагружения. Примечательно, что локальная намагниченность стали 65Г наводится на площадь круга диаметром 30 мм, ударная нагрузка прикладывается непосредственно на часть намагниченной площади (диаметр ударника 11 мм), но изменение напряженности магнитного поля локальной намагниченности стали 65Г практически такое же, как и всего цилиндрического образца из стали 60Г при его нагружении осевым растяжением, т.е. ударная волна, пробегая по образцу, осуществляет его магнитоупругое размагничивание. Это вселяет надежду на возможное техническое применение способа локального нагружения для изучения магнитоупругих явлений в сталях. Так, разброс в показаниях при повторяющихся измерениях напряженности поля H_σ после ударного нагружения и ошибка при определении таким способом магнитоупругой чувствительности составляет 5—9 %

Связь между магнитоупругой чувствительностью Λ, коэрцитивной силой H_c и соответствующей магнитострикцией λ (λ_m или $\lambda_п$) стали может быть получена из гиперболического [11] и экспоненциального [24, 28] законов магнитоупругого размагничивания соответственно.

При гиперболическом приближении [11]:

$$\beta_i \frac{H_c \cdot \Delta H}{H_0 \cdot H_\sigma \cdot \Delta\sigma} = \Lambda \frac{H_c}{H_\sigma} = \lambda. \quad (4)$$

При экспоненциальном приближении [24, 28]:

$$\gamma_i \frac{H_c \cdot \Delta H}{H_0 \cdot \Delta\sigma} = \Lambda \cdot H_c = \lambda, \quad (5)$$

где Λ — магнитоупругая чувствительность остаточно намагниченного образца (элемента образца) (1), β_i и γ_i — коэффициенты пропорциональности.

Графически эта связь для стали 60Г показана на рис. 9 и 10. Видно, что пиковое значение магнитострикции $\lambda_п$ лучше коррелирует с предложенными уравнениями регрессии, чем λ_m. Согласно приведенным на рис. 9 и 10 результатам, используя предложенную связь коэрцитивной силы и магнитоупругой чувствительности, можно оценивать магнитоупругим методом магнитострикцию λ_m и $\lambda_п$ с погрешностью от 4 до 15 %.

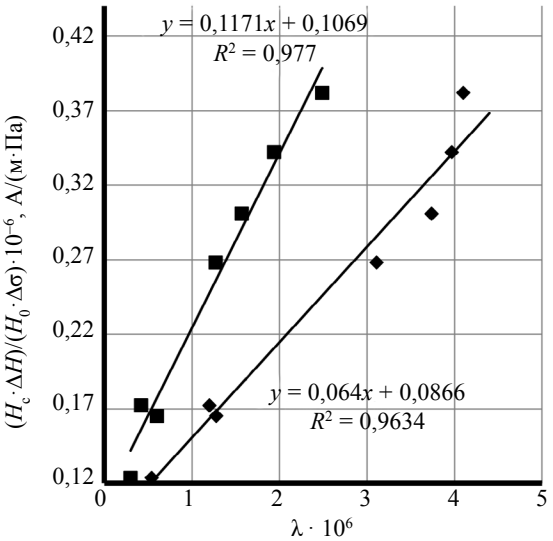

Рис. 9. Зависимость произведения магнитоупругой чувствительности Λ стали 60Г и ее коэрцитивной силы H_c от магнитострикци λ_m (♦) и $\lambda_п$(■) соответственно.

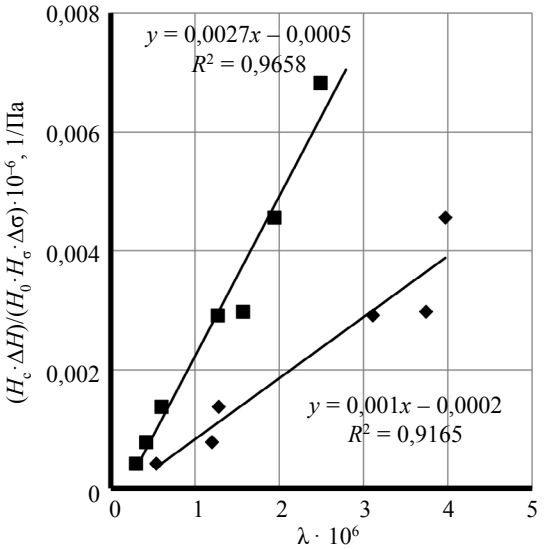

Рис. 10. Зависимость отношения произведения магнитоупругой чувствительности Λ стали 60Г и ее коэрцитивной силы H_c к напряженности магнитного поля рассеяния H_σ после нагружения — разгружения от магнитострикци λ_m (♦) и $\lambda_п$ (■) соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено разделение экспериментальной полевой зависимости магнитострикции отпущенной стали 60Г на положительную составляющую, обусловленную процессами смещения междоменных границ, и отрицательную, связанную с процессами вращения.

2. Установлена связь магнитострикции смещения и коэрцитивной силы с чувствительностью сталей 60Г и 65Г к упругим напряжениям при магнитоупругом размагничивании. Высказано предположение, что оно реализуется главным образом процессами необратимого смещения междоменных границ.

3. Предложена методика косвенной оценки магнитострикции конструкционной стали по величине магнитоупругого размагничивания при механическом воздействии на сталь и коэрцитивной силы. Полученные результаты могут способствовать повышению точности оценки упругих напряжений в стальной конструкции магнитоупругими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горкунов Э.С., Новиков В.Ф., Ничипурук А.П., Нассонов В.В., Кадров А.В., Татлыбаева И.Н.* Устойчивость остаточной намагниченности термически обработанных стальных изделий к действию упругих деформаций // Дефектоскопия. 1991. № 2. С. 68—76.

2. *Акулов Н.С.* Ферромагнетизм. М.—Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1939. 188 с.

3. *Вонсовский С.В., Шур Я.С.* Ферромагнетизм. М.—Л.: ГИТТЛ, 1948. 816 с.

4. *Бозорт Р.* Ферромагнетизм. М.: ГИТТЛ, 1956. 784 с.

5. *Takagi M.* On a statistical Domain theory of Ferromagnetic cristals. Part II //Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ. 1939. V. 28. P. 85—127.

6. *Деордиев Г.И., Бикташев Т.Х.* Магнитострикционный способ измерения напряжений в элементах металлоконструкций // Дефектоскопия. 1977. № 3. С. 82—91.

7. *Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М.* Влияние упругой одноосной деформации среднеуглеродистой стали на ее магнитострикцию в продольном и поперечном направлениях // Дефектоскопия. 2013. № 10. С. 40—52.

8. *Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Соловьев К.Е., Задворкин С.М.* Влияние магнитоупругого эффекта на гистерезисные свойства среднеуглеродистой стали при одноосном нагружении // Дефектоскопия. 2010. № 9. С. 17—25.

9. *Горкунов Э.С., Мушников А.Н.* Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. № 12. С. 4—23.

10. *Сербин Е.Д., Костин В.Н.* О возможности оценки магнитострикционных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам // Дефектоскопия. 2019. № 5. С. 31—36.

11. *Новиков В.Ф., Бахарев М.С.* Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках.Тюмень: Вектор Бук, 2001. 219 с.

12. *Новиков В.Ф., Кострюкова Н.К., Нассонов В.В., Федоров Б.В., Рыбникова О.И.* Изменение магнитострикции некоторых сталей на начальных стадиях пластической деформации // Дефектоскопия. 1995. № 7. С. 105—110.

13. *Новиков В.Ф., Тихонов В.Ф.* К изучению усталостных изменений в металле при изгибных колебаниях лопаток турбин магнитными и магнитоупругими методами // Проблемы прочности. 1981. № 5. С. 13—17.

14. *Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х.* Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении //Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 21—31.

15. *Новиков В.Ф, Яценко Т.А., Бахарев М.С.* К природе пьезомагнитного эффекта остаточно намагниченного состояния магнетика // Известия ВУЗов. Нефть и газ. 1998. № 4. С. 96—102.

16. *Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р., Осипов К.О.* Исследование влияния структуры и элементного состава сплава на результаты магнитного контроля напряженного состояния металла // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 7. С. 55—61.

17. *Мушников А.Н.* Влияние объемного напряженного состояния на магнитные характеристики конструкционных сталей / Дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург, 2021.163 с.

18. ГОСТ Р 55612—2013 Национальный стандарт Российской Федерации. Контроль неразрушающий магнитный Термины и определения. Magnetic non-destructive inspection. Terms and definitions ОКС 01.040.19 19.100. Дата введения 2015-01-01.

19. *Гольдштейн Ю.Б.* Основы механики твердого деформируемого тела / Учебное пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 872 с.

20. *Кошелев А.И.* Механика деформируемого твердого тела / Электронный учебник. Санкт-Петербург: С.-Петерб. гос. ун-т, 2005. 287 с.

21. *Елисеев В.В.* Механика деформируемого твердого тела. Санкт-Петербург: С.-Петерб. гос. ун-т, 2006. 231 с.

22. *Новиков В.Ф., Кулак С.М., Парахин А.С.* Определение осевых напряжений стали в режиме памяти по экспоненциальному закону магнитоупругого размагничивания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 6. С. 54—62.

23. *Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Казаков Р.Х.* Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 1. С. 19—25.

24. *Novikov V.F., Kulak S.M., Parakhin A.S. T*esting Uniaxial Stresses in Steels with Allowance for Their Magnetoelastic Sensitivity // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 4. P. 310—319.

25. *Novikov V.F., Muratov K.R., Kulak S.M., Parakhin A.S., Sokolov R.A.* Features of Magnetostriction in Carbon Steels // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2021. Is. 5. P. 6—14.

26. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука,1978. 508с.

27. *Парахин А.С.* ЭВМ в лабораторном практикуме / Учебное пособие. Курган: Изд-во Кург. гос. ун-та, 2000. 109 с.

28. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.

ИТОГИ XVI МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ». ПАМЯТИ АКАДЕМИКА ЭДУАРДА СТЕПАНОВИЧА ГОРКУНОВА

С 16 по 20 мая 2022 г. в Екатеринбурге прошла XVI Международная научно-техническая конференция «МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ». Основными организаторами по подготовке и проведению конференции выступили Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральское отделение Российской академии наук, Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Технический комитет 17 (Неразрушающая оценка) Европейского общества структурной целостности (ESIS), Российский комитет ESIS, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Конференция была посвящена памяти академика Эдуарда Степановича Горкунова, крупного специалиста в области создания магнитных, электромагнитных и электромагнитно-акустических методов неразрушающего контроля и технических средств оценки фактических состояний изделий и элементов конструкций, определения ресурса ответственных объектов техники. Творческий путь Э.С. Горкунова на протяжении 30 с лишним лет был связан с журналом «Дефектоскопия». Высокий профессионализм Э.С. Горкунова способствовал объединению редакционной коллегии журнала, обеспечению ее плодотворной работы. В журнале «Дефектоскопия» опубликована значительная часть его научных работ. На статьях и монографиях Э.С. Горкунова воспиталось не одно поколение российских и зарубежных специалистов в области неразрушающего контроля и технической диагностики.

XVI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» продолжает традиции конференций «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» и «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», проводимых с 2001 года. Цель конференции — инициирование усилий ученых в области механики материалов, материаловедения и неразрушающего контроля, а также специалистов промышленности для решения научных и прикладных задач.

На конференции рассматривались вопросы по следующим актуальным направлениям фундаментальных и прикладных исследований:

• Новые методики исследования и прогнозирования ресурса механизмов и конструкций в процессе изготовления и эксплуатации на основе комплексного подхода к методам оценки текущего состояния конструкционных и функциональных материалов с позиций неразрушающего контроля, материаловедения и механики.

• Методологии использования результатов неразрушающего контроля и материаловедческого анализа в моделях механики для прогнозирования ресурса материалов и конструкций.

• Современные технологии проектирования, изготовления, обработки и испытания материалов с целью повышения уровня функциональных свойств, долговечности, надежности и живучести деталей машин и элементов конструкций, работающих в экстремальных условиях.

• Междисциплинарный подход к изучению перспективных материалов с многоуровневой иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций.

• Комплексные исследования и прогнозирование ресурса биологических объектов и живых организмов на основе неразрушающего контроля, материаловедения и биомеханики.

На церемонии открытия с приветственным словом к участникам конференции выступили Председатель Уральского отделения Российской академии наук, академик РАН В.Н. Чарушин и директор Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, академик РАН Н.В. Мушников. Приветствие к организаторам и участникам конференции от Министерства промышленности и науки Свердловской области зачитал председатель организационного комитета конференции С.В. Смирнов.

В организации работы конференции приняли участие ведущие специалисты в области материаловедения, а также механики и диагностики материалов. Общее количество участников составило 225 человек. На конференции были представлены различные регионы России, с докладами выступили ученые из Екатеринбурга, Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Томска, Красноярска, Перми, Самары, Благовещенска, Воронежа, Ижевска, Иркутска, Тольятти, Тюмени, Якутска, Твери, Челябинска, Миасса и Заречного.

Работа конференции была организована в виде пленарных и секционных заседаний, а также экспозиции стендовых докладов на сайте конференции. За время работы конференции были обсуждены 204 доклада: 18 пленарных докладов, 73 устных, в том числе 9 приглашенных докладов, и 63 постерных; 50 участников сделали доклад дистанционно. Были заслушаны доклады представителей как академической, так и вузовской науки. Ряд сообщений сделали известные ученые из научно-производственных объединений и предприятий.

С пленарными докладами выступили 5 академиков РАН, 3 члена-корреспондента РАН, 10 докторов наук. Конференция носила междисциплинарный характер, поэтому на пленарных докладах были затронуты важные вопросы, касающиеся проблем создания и обработки новых материалов, долговечности и прочности конструкций, медицины.

Особо можно отметить три пленарных доклада, которые по научной тематике соответствуют журналу «Дефектоскопия» и вызвали наибольший интерес.

Доклад члена-корр. РАН А.В. Макарова (ИФМ УрО РАН, Екатеринбург) был посвящен реализации и перспективам развития идей академика Э.С. Горкунова в области магнитного и электромагнитного контроля механических характеристик сплавов и качества современных упрочняющих обработок. В презентации своего доклада Макаров А.В. использовал «дерево магнитного структурно-фазового анализа», предложенное Эдуардом Степановичем Горкуновым для схематического изображения возможностей использования магнитных методов неразрушающего контроля структуры и фазового состава. Корнями дерева являются физическое материаловедение, физика

магнитных явлений, механика деформируемого твердого тела и научное приборостроение, ветви соответствуют определенным направлениям контроля, а листья — методам и способам контроля. Схематическое изображение дерева на слайде сопровождали стихи, авторство которых принадлежит докладчику Алексею Викторовичу Макарову.

Доктор технических наук В.А. Полянский (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург) выступил с пленарным докладом на тему: «Влияние поврежденности на особенности поведения магнитных и акустических характеристик металлических образцов», в котором рассказал о результатах исследований особенностей изменения акустических характеристик и распределения концентрации водорода при малоцикловой усталости и после экспонирования в коррозионной среде. Эти исследования являются развитием работ Э.С. Горкунова по установлению связи магнитных характеристик стальных изделий с деградацией их функциональных свойств при малоцикловой усталости, а также при воздействии коррозионной среды.

Доклад академика В.Г. Дегтяря (ГРЦ Макеева, г. Миасс) был посвящен совместным с ИМАШ УрО РАН исследованиям по обоснованию продления сверхгарантийных сроков безопасной эксплуатации и хранения изделий ракетной техники.

Секционная работа конференции традиционно проходила по нескольким направлениям: механика поврежденности и разрушения; структурные аспекты деформации и разрушения; контроль и диагностика материалов и конструкций; материалы с многоуровневой иерархической структурой; вопросы моделирования материалов с многоуровневой иерархической структурой; физические методы диагностики и материаловедения в медицине; механика жидкости и газа в технических и живых системах.

На заседаниях секций № 3 «Контроль и диагностика материалов и конструкций» и № 6 «Физические методы диагностики и материаловедения в медицине» были представлены на обсуждение 29 устных и стендовых докладов. Бóльшая их часть была посвящена активно развиваемому Э.С. Горкуновым направлению исследований по созданию и совершенствованию магнитных, электромагнитных и электромагнитно-акустических методов диагностики фактических состояний изделий и элементов конструкций, определения ресурса ответственных объектов техники.

В результате работы конференции после обсуждения докладов, обмена информацией о проводимых и планируемых работах были сделаны следующие выводы:

• Отмечена важность и эффективность многоуровневых подходов к вопросам оценки ресурса материалов и конструкций, что требует совершенствования существующих и разработки новых моделей подхода к дизайну материалов и моделированию процессов оценки их ресурса.

• Особенностью конференции является участие в ней специалистов различных научных направлений, что позволяет объединить ученых в областях механики материалов, материаловедения и неразрушающего контроля, а также привлечь специалистов промышленности для решения научных и прикладных задач.

• Доклады и их обсуждение продемонстрировали высокую заинтересованность участников в проблематике конференции, а также показали широкую вовлеченность молодых исследователей.

• Обсуждения в рамках конференции выявили необходимость и перспективность развития исследований в рамках научных направлений работы конференции.

Редколлегия