

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 3
2021

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

А.А. Марков, Е.А. Максимова. Анализ параметров ультразвуковых сигналов при высокоскоростном контроле рельсов..... 3

Электромагнитные методы

Борис Велев, Иван Иванов, Владимир Каменов. Автоматизированная система комплексного неразрушающего контроля структуры и механических свойств материалов машиностроения..... 17

Ашвани Шарма, Абхиманью Чаудхари, Акаш Субхаш Авале, Мохд Захир Хан Юсуфзай, Меганшу Вашиста. Влияние условий шлифования на магнитный отклик инструментальной стали AISI D2..... 26

Радиационные методы

С.П. Осипов, И.Г. Ядренкин, С.В. Чахлов, О.С. Осипов, Е.Ю. Усачёв, А.А. Манушкин. Вычислительная модель рентгеновской компьютерной томографии с функцией оценки плотности..... 37

С.П. Осипов, И.А. Прищепа, С.В. Чахлов, О.С. Осипов, Е. Ю. Усачёв. Алгоритмы моделирования формирования и обработки информации в рентгеновской томографии пеноматериалов..... 53

Информация..... 66

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ КОНТРОЛЕ РЕЛЬСОВ

© 2021 г. А.А. Марков^{1,*}, Е.А. Максимова¹

¹ОАО «Радиоавионика», Россия 190005 Санкт-Петербург, Троицкий пр., 4Б
*E-mail: amarkovspb@gmail.com

Поступила в редакцию 08.12.2020; после доработки 22.12.2020

Принята к публикации 15.01.2021

Приведены результаты исследований параметров ультразвуковых сигналов с увеличением скорости контроля рельсов. В качестве тестовых отражателей выбраны сигналы от болтовых отверстий рельсов. Показано, что ближайшие к рельсовому стыку отверстия озвучиваются не полностью, и сигналы от них не могут быть использованы в качестве тестовых отражателей. Для полноценной оценки ухудшения качества неразрушающего контроля рельсов с увеличением скорости сканирования предложено использовать интегральный показатель анализируемого отражателя. Заметное уменьшение этого показателя при высоких скоростях требует принятия компромиссного решения при выборе между производительностью и качеством контроля рельсов. Предложенная методика может быть использована для оценки эффективности эксплуатируемых и вновь создаваемых дефектоскопических комплексов. Обоснована необходимость совершенствования способов озвучивания первых болтовых отверстий стыков и корректировки нормативных документов применительно к высокоскоростному контролю рельсов.

Ключевые слова: ультразвук, дефектоскопия, рельсы, высокоскоростной контроль, развертка типа В, параметры сигналов, условная протяженность отражателя, интегральный показатель.

DOI: 10.31857/S0130308221030015

ВВЕДЕНИЕ

Требования к увеличению скорости сканирования при ультразвуковом (УЗ) контроле рельсов всегда были актуальными [1—4]. Если не так давно скорости сканирования 90 км/ч казались предельными [1—3], то в настоящее время уже декларируется возможность контроля при скоростях до 140 км/ч [4].

В последние годы неоднократно проводились эксперименты по прицепке вагонов-дефектоскопов к пассажирским поездам и работе дефектоскопического оборудования в составе диагностических комплексов инфраструктуры (ДКИ) со скоростями движения до 120 км/ч. Но на практике реально реализуемые скорости редко превышали 110 км/ч. По мере накопления информации с этих поездок появляется возможность исследования параметров сигналов контроля рельсов.

Целью настоящих исследований является оценка качества контроля рельсового пути в широком диапазоне скоростей сканирования. Результаты этих исследований могут быть применены как для дальнейшего совершенствования систем скоростного контроля, так и для обоснования предельных скоростей сканирования при заданных критериях обнаружения искомых дефектов.

1. МЕТОДИКА АНАЛИЗА СИГНАЛОВ КОНТРОЛЯ

Имеющиеся на многих железных дорогах специальные (испытательные) участки пути с разными моделями дефектов рельсов предназначены для настройки и проверки работоспособности аппаратуры вагонов-дефектоскопов предыдущего поколения, имеют ограниченные (малые) протяженности и редко позволяют обеспечить скорости сканирования выше 30—50 км/ч. Создание специального испытательного участка пути для высоких скоростей (до 120 км/ч) является весьма дорогостоящим проектом и не всегда технически оправдано, т.к. поверхности катания и само состояние рельсов на действующих путях и на малонагруженных испытательных участках заметно отличаются.

В то же время изучение влияния высоких скоростей контроля на характеристики сигналов от дефектов целесообразно проводить по экосигналам от отражателей с известными параметрами, зафиксированными на реальных дефектограммах. Для анализа необходимо подобрать однотипные отражатели в достаточном для статистического анализа количестве, которые имеют идентичные параметры и уверенно фиксируются во всем диапазоне скоростей сканирования.

Исходя из этих требований, в качестве тестовых отражателей нами предложено использовать отверстия болтовых стыков рельсов (рис. 1). Указанные отверстия диаметром 36 мм (для рельсов

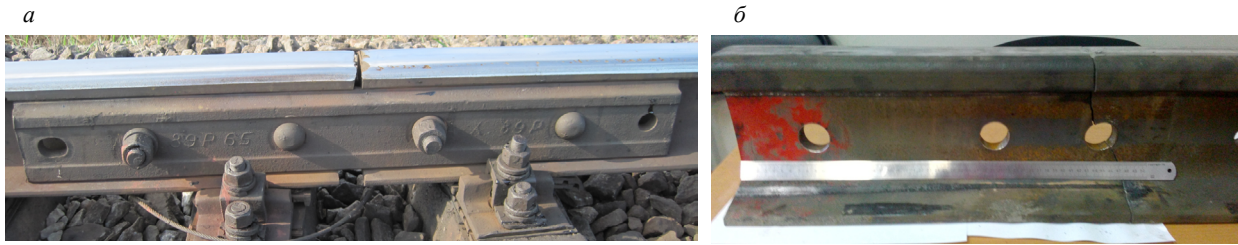


Рис. 1. Болтовой стык рельсов в шестидырных накладках (а); на концах стыкуемых рельсов имеются по три болтовых отверстия (б).

типа Р65) выполняются в соответствии с ГОСТ Р 51685—2013 (Рельсы железнодорожные. Общие технические условия) и, несмотря на массовый переход на бесстыковой путь [5], имеются в достаточном количестве на действующих путях в зоне разрядных (уравнительных) звеньев и в местах временного восстановления рельсовых плетей. Кроме того, на железных дорогах все еще осталось немало участков звеньевых пути.

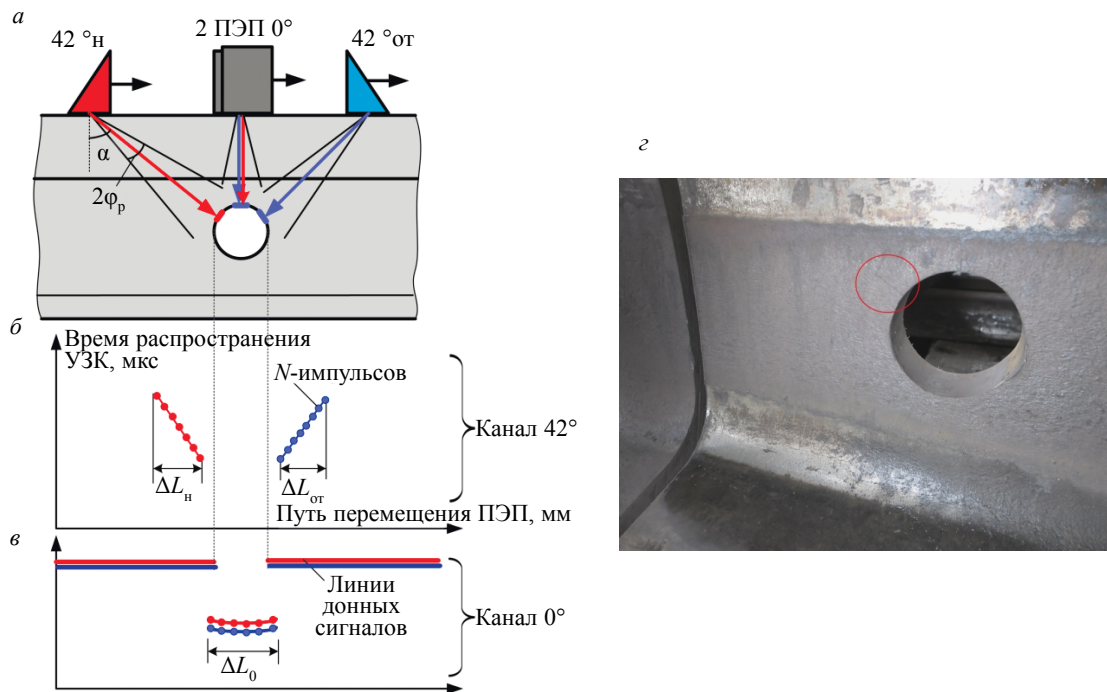


Рис. 2. Схема озвучивания болтового отверстия УЗ преобразователями (а) и отображение сигналов на развертке типа В (б — для каналов наклонных ПЭП с углом 42° ; в — для каналов ПЭП с углом 0°); з — изображение болтового отверстия с трещиной.

На рис. 2а приведена схема прозвучивания зоны шейки рельсов с отверстиями, характерная для всех средств сплошного УЗ контроля рельсов, применяемых как в России [6, 7], так и во многих странах мира [8]. В процессе движения искательной системы по поверхности катания рельса боковые стенки отверстия последовательно озвучиваются поперечными УЗ колебаниями под углами ввода $\alpha = +42^\circ$ и $\alpha = -42^\circ$ с двух сторон «наезжающим — н» и «отъезжающим — от» пьезопреобразователями (в некоторых системах контроля эти углы принимают равным $\pm 45^\circ$ или $\pm 35^\circ$ [6, 8]). На дефектограмме (развертке типа В [6]) формируются две наклонные линии (пачки) сигналов с количеством импульсов N и условной протяженностью по длине рельса ΔL (рис. 2б). Прямые пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) осуществляют ввод продольных УЗ колебаний нормально ($\alpha = 0^\circ$) к поверхности сканирования. По мере сканирования отражения от верхней стенки отверстия на развертке типа В формируют дугобразные пачки сигналов и прерываются линии донных сигналов (рис. 2в).

Диапазон анализируемых скоростей контроля рельсов выбран из следующих соображений. Еще совсем недавно (2000—2017 гг.) на сети дорог ОАО «РЖД» установленная скорость контроля рельсов мобильными средствами составляла 35 км/ч. Согласно «Положению о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД» (утв. расп. ОАО «РЖД» от 26.07.2017 г. № 1471/р), с 2017 г. диагностические вагоны стали проводить сплошной контроль на скоростях до 60—80 км/ч. В настоящее время (2020 г.) на Российских железных дорогах эксплуатируются более десяти ДКИ двух производителей, по паспортным данным которых допускаются скорости контроля рельсов выше 100 км/ч (на рисунках, приведенных ниже, эти средства обозначены как комплекс А и Б). В связи с этим исследование поведения дефектоскопических сигналов проводили в диапазоне от 30 до 100 км/ч.

В каждом десятикилометровом диапазоне скоростей анализировали сигналы от 200 болтовых отверстий (всего проанализированы параметры сигналов от более 1400 отверстий). Подсчет количества обнаруженных болтовых отверстий осуществлялся в соответствии с требуемыми критериями сигналов от отверстий на развертке типа В, указанными в действующем нормативно-техническом документе (НТД) — «Положении по расшифровке дефектограмм» (утв. расп. ОАО «РЖД» от 09.01.2018. № ЦДИ-1/р).

Проконтролированными считались болтовые отверстия, от которых получены три группы (пачки) эхосигналов в каналах ПЭП с углами 42° и 0° (две наклонные и одна дугообразная пачка как на рис. 2б, в) с условной протяженностью $\Delta L > 20$ мм и количеством сигналов N не менее 4-5 штук (при меньшем количестве точек на развертке типа В сигналы трудно распознать как «пачку» сигналов на фоне помех) при озвучивании с каждой стороны.

Отметим, что по данному НТД анализируют (выполняют расшифровку) сигналы контроля рельсов как съёмными ($V = 4\text{—}5$ км/ч), так и мобильными (V до 60 и до 120 км/ч) средствами дефектоскопии. В то же время известно, что при постоянной частоте F посылок зондирующих импульсов количество N ожидаемых от отражателя эхосигналов обратно пропорционально скорости V сканирования и прямо пропорционально условной протяженности пачки ΔL :

$$N = (\Delta L \cdot F) / V. \quad (1)$$

Как видно (рис. 3), при типовой для вагонов-дефектоскопов частоте посылок зондирующих импульсов $F = 4,0$ кГц и условной протяженности получаемых от отражателей пачек сигналов $\Delta L = 20$ мм (красная кривая), условие обнаружения по НТД может быть выполнено только при скоростях V , не превышающих 57 км/ч. А при максимальных скоростях сканирования (120 км/ч) в зоне локации $\Delta L = 20$ мм будут приняты не более двух эхосигналов, что, естественно, недостаточно для выделения их на фоне всевозможных помех. Минимальный условный размер отражателя, обнаруживаемый при предельной скорости 120 км/ч, как видно из рис. 3, составляет более 40 мм. Для частичной компенсации этих ограничений, как будет показано ниже, в современных ДКИ принимают специальные меры.

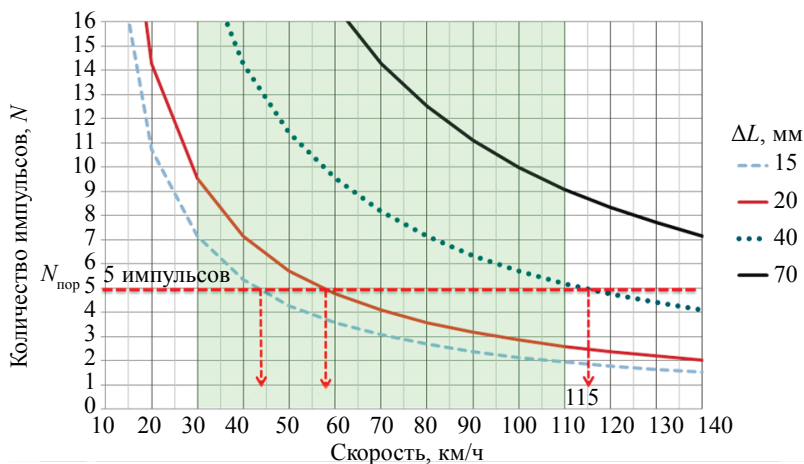


Рис. 3. Зависимость количества ожидаемых от отражателей эхоимпульсов от скорости сканирования для разных условных размеров ΔL дефектов (при частоте $F = 4,0$ кГц): зеленым фоном выделен диапазон исследуемой области скоростей сканирования.

Весьма интересным представляется изучение не только зависимости обнаружения ультразвуковым методом количества N типовых отражателей на разных скоростях, но и изменения их параметров: значений условной протяженности ΔL (по ГОСТ 18576—96. Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные. Методы ультразвуковые), а также амплитуды эхосигналов в пачках. Их обобщающий показатель при многоканальном контроле, как показано в [9], удобно представлять в виде интегрального показателя K_{int} , формирующего более достоверную информацию присутствия дефекта (в данном случае, отверстия диаметром 36 мм) с учетом параметров всех принятых от него сигналов.

Результаты этих исследований должны позволить выяснить основные причины изменения параметров эхосигналов при реализации высокоскоростного контроля для последующего принятия мер по улучшению качества контроля.

2. ПРОБЛЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КОНТРОЛЯ

Выполненный обзор отечественной и зарубежной литературы показывает, что, несмотря на начало серийного внедрения высокоскоростного контроля рельсов на железных дорогах России и других стран [1, 4, 7, 8], подробный анализ выявляемости дефектов в рельсах при высоких скоростях сканирования проводился мало.

По результатам исследований немецких специалистов [1] о зависимости обнаружения типовых дефектов от скорости можно отметить, что они получили весьма настораживающие результаты. Уже на скоростях 40—60 км/ч из 80 типовых дефектов было обнаружено менее 20 дефектов. Это позволило им сделать предварительные выводы что «скорость более 60 км/ч очень близка к физическим пределам для УЗ контроля» и «похоже, не стоит использовать инспекционные поезда со скоростью более 90 км/ч...». Причем зависимость количества успешно обнаруженных дефектов экспоненциально уменьшается с увеличением скорости.

Понимая вышеизложенные ограничения, в отечественных комплексах для высокоскоростной дефектоскопии разработчиками принят ряд мер.

Во-первых, частота F посылок зондирующих импульсов является не постоянной, а управляется пропорционально скорости сканирования V . С одной стороны, это позволяет не загружать систему излишней информацией (большим количеством импульсов) при малых скоростях сканирования, с другой стороны, — при максимальных скоростях возможно сохранить на приемлемом уровне дискретность озвучивания дефектов по длине рельсов.

Однако пределы увеличения частоты посылок зондирующих импульсов F ограничены максимальной глубиной залегания подлежащих к выявлению дефектов в подошве рельса (высота рельса типа Р65 равна 180 мм) и требуемыми углами ввода УЗ колебаний (с учетом угла раскрытия диаграммы направленности наклонных ПЭП до 50°). Таким образом, на практике частота посылок F ограничивается 5,0 кГц (межпериодный интервал не превышает 200 мкс). При этом смещение ПЭП за время пробега УЗ колебаний до дефекта и обратно при высоких скоростях уже составляет величину, сравнимую с активными размерами приемно/излучающих пьезопластин ПЭП.

Во-вторых, с учетом вышесказанного, приняты дополнительные меры по увеличению апертуры излучения/приема УЗ колебаний путем применения двух рядом расположенных однонаправленных преобразователей для фиксированных углов в схеме прозвучивания [10, 11]. Излучение в рельс ультразвуковых зондирующих сигналов несколькими однонаправленными наклонными преобразователями и получение ими отраженных ультразвуковых сигналов при совместной обработке позволяет компенсировать уменьшение количества принимаемых сигналов с увеличением скорости, обеспечивая заданное разрешение по длине рельса. Как показано ниже, эти меры вносят положительный вклад при обнаружении отражателей на высоких скоростях сканирования.

Вопреки жестко установленным в НТД (ГОСТ 34524—2019. Рельсы железнодорожные. Неразрушающий контроль в условиях эксплуатации. Общие требования) уровням чувствительности контроля рельсов без какого-либо учета скоростей сканирования и состояния контролируемых рельсов (пропущенный тоннаж, износ головки, кривые и прямые участки пути, повреждение поверхности катания микротрещинами и др.), для получения приемлемого качества контроля на значительных скоростях специалисты диагностических комплексов вынуждены повышать чувствительности контроля. Естественно, с одновременным повышением уровня помех, это позволяет несколько увеличить и зону выявления отражателей. Путем отслеживания переменного уровня шумовой составляющей и выставления порогового уровня над средним уровнем шума (адаптивный порог) удастся повысить эффективность скоростного контроля [12]. Учет скорости нараста-

ния переднего фронта искомых эхосигналов от дефектов, как утверждают авторы [13], дополнительно повышает эффективность адаптивного порога.

Весьма важной и нерешенной полностью проблемой при значительных скоростях сканирования является обеспечение стабильного акустического контакта в реальных условиях контроля рельсового пути. Выбор износостойких протекторов УЗ преобразователей (ПЭП), оптимизация систем подачи контактирующей жидкости и прижатия ПЭП к поверхности сканирования позволяют только частично обеспечивать относительно приемлемый контроль рельсов на столь высоких скоростях движения [7, 9].

Необходимо также отметить, что зона болтовых стыков, с точки зрения дефектоскопии, является весьма сложным участком. Даже на участках пути, полностью удовлетворяющих эксплуатационным требованиям, на концах рельсовых звеньев могут наблюдаться некоторые отклонения от геометрии (понуры и смещения концов рельсов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, поверхностные расслоения и т. п.). С увеличением скоростей сканирования эти отклонения, даже если они находятся с точки зрения эксплуатации пути в допустимых пределах, отрицательно влияют на качество контроля.

В совмещенных вагонах-дефектоскопах (с рабочими скоростями до 60 км/ч) для размещения дефектоскопического оборудования (искательной системы) применяли дополнительную индукторную тележку, располагаемую под средней частью вагона [6], что создавало благоприятные условия для размещения системы намагничивания для реализации магнитного метода контроля (метода вытеснения магнитного потока — MFL) [14, 15] и подвески блоков ультразвуковых преобразователей с системами прижатия и центровки. В новых диагностических комплексах, по соображениям безопасности при высоких скоростях контроля, искательные системы пришлось разместить в ограниченных пределах ходовых тележек. Это решение существенно усложнило задачу обеспечения стабильного акустического контакта между преобразователями и поверхностью контролируемого рельса. К уже имеющимся проблемам добавился и неравномерный упругий прогиб рельсов на болтовых стыках под ходовой тележкой вагона (под весом вагона, распределенным до 10 т на каждое колесо), также усложняющий задачу обеспечения стабильного акустического контакта.

Несмотря на указанные сложности и проблемы, принятые технические решения позволили получить более или менее допустимые результаты в рассматриваемом диапазоне скоростей сканирования.

3. АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВА ОБНАРУЖИВАЕМЫХ ОТВЕРСТИЙ

3.1. Общее количество выявляемых болтовых отверстий

На рис. 4 приведены результаты анализа выявляемости (в соответствии с требованиями Положения о расшифровке) болтовых отверстий наклонными ПЭП с углом 42° в диапазоне скорости

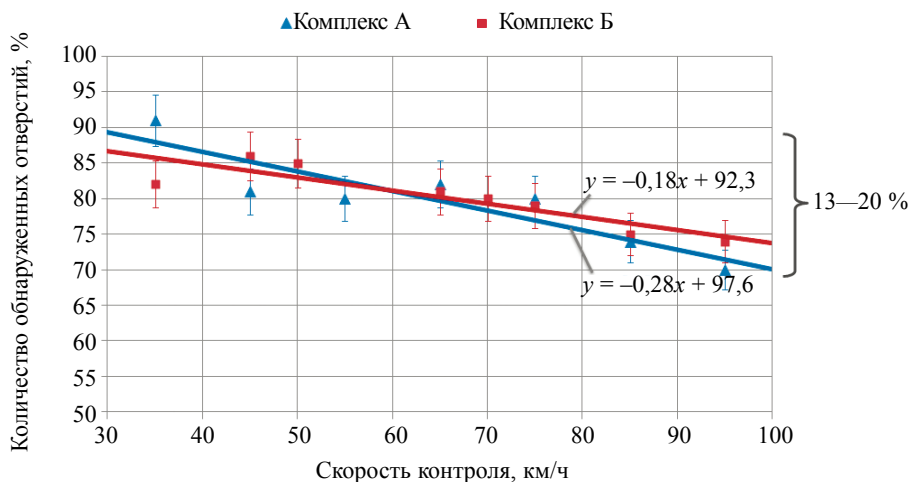


Рис. 4. Количество (в %) зафиксированных наклонными ПЭП с углом 42° болтовых отверстий на разных скоростях УЗ контроля.

стей контроля от 30 до 100 км/ч для двух систем скоростного контроля разных производителей. Данные получены при контроле обычных путей протяженностью 140 км со смешанным движением пассажирских и грузовых поездов (комплекс дефектоскопии А) и на участках пути с высокоскоростным движением (на участке Москва — Санкт-Петербург) с общей протяженностью 170 км (комплекс Б). Качество содержания пути на выбранных участках не оказало существенного влияния на результаты контроля (содержание пути на участке контроля комплексом Б заметно лучше), хотя очевидно, что с ухудшением содержания пути результаты измерений могут быть хуже.

Как видно, обе системы высокоскоростного контроля рельсов, несмотря на определенные отличия в принятых технических решениях, в указанном диапазоне скоростей болтовые отверстия выявляют практически идентично (в пределах допустимой погрешности). Это может свидетельствовать о том, что процессы, отрицательно влияющие на обнаружение отражателей при высоких скоростях сканирования, в основном, имеют общую закономерность.

Угол наклона полученных на рис. 4 линейных зависимостей показывает ухудшение выявляемости отверстий на 2—3 % при каждом увеличении скорости сканирования на 10 км/ч. Выявляемость таких больших (с точки зрения дефектоскопии) отражателей в рельсах, как болтовых отверстий диаметром 36 мм, при увеличении скорости от 30 до 100 км/ч снижается на 13—20 %.

Сравнивая полученные результаты с исследованиями немецких специалистов [1] по зависимости обнаружения характерных дефектов рельсов от скорости, можно отметить, что они получили несколько иные результаты. Видимо, реализация рассмотренных в разделе 2 технических решений позволило вместо экспоненциального спада обнаруживаемых отражателей [1] получить линейную зависимость (рис. 4) с приемлемым для высоких скоростей контроля коэффициентом спада. Возможно, существенные отличия в результатах вызваны и тем, что в [1] рассматривали выявляемость разных типов дефектов, а в данном исследовании — однотипные округлые отражатели (болтовые отверстия) достаточно большого размера.

В то же время можно отметить, что реальные дефекты, как правило, обнаруживаются одновременно несколькими каналами. В частности, при фиксации дефекта в головке рельса оператор в большинстве случаев принимает решение по сигналам, полученным от двух до девяти каналов [16], причем размеры пачек сигналов при этом весьма часто не уступают размерам сигналов от болтовых отверстий. От реальных дефектов в шейке и в подошве рельса во многих случаях фиксируются группы сигналов, принятых наезжающим и отъезжающим ПЭП с размерами, также не уступающими размерам пачек сигналов от болтовых отверстий. Естественно, в реальных ситуациях контроля возможны случаи фиксации дефектов на начальной стадии развития только одним из каналов с весьма малыми размерами. В целом, можно считать, что сигналы от болтовых отверстий при проведении экспресс-оценки эффективности контроля при больших скоростях вполне могут служить в качестве имитаторов сигналов от реальных дефектов рельсов.

Для повышения надежности контроля и отслеживания качества акустического контакта в схеме прозвучивания дефектоскопного комплекса А используется два прямых ПЭП с углами ввода 0° , размещенные в начале и в конце искательной системы (рис. 5) [6, 7]. Сигналы двух прямых ПЭП отображаются в общей зоне регистрации и специально несколько смещены друг над другом для улучшения наглядности при анализе дефектограмм (см. рис. 2в).

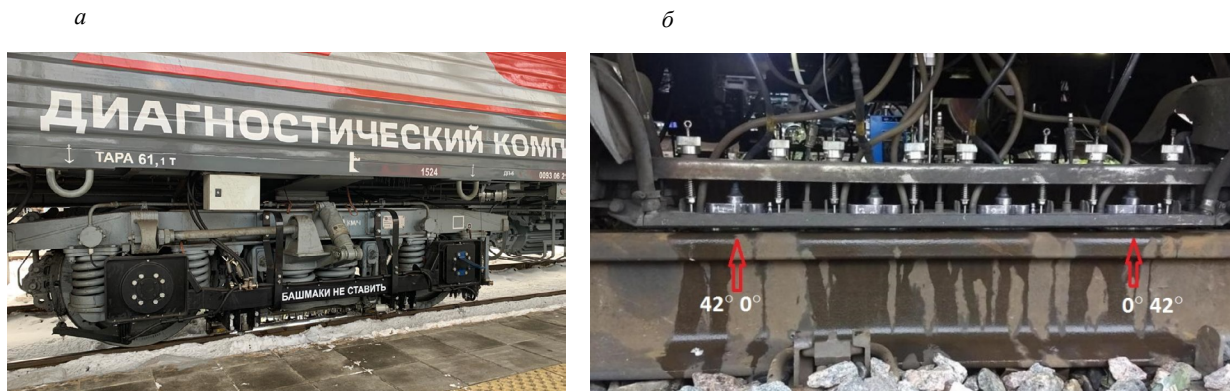


Рис. 5. Искательная система диагностического комплекса:
 а — размещение дефектоскопической лжи между колесами ходовой тележки вагона; б — стрелками и цифрами указаны ПЭП с соответствующими углами ввода для контроля шейки рельса.

Дублирование каналов прямых ПЭП с углом ввода 0° , реализующих эхо и зеркально-теневой методы, дает весьма положительные результаты, особенно при высоких скоростях сканирования. Значительно уменьшается количество непроконтролированных участков после проезда вагона-дефектоскопа, которые приходится повторно перепроверять (например, съемными дефектоскопными тележками). Количество выявленных отверстий прямыми ПЭП оказалось примерно на 10 % больше, чем наклонными ПЭП с углом 42° . Применение парных ПЭП [10] с углом ввода 42° также ощутимо повышает обнаружение отверстий при увеличении скоростей (до 10 % при скоростях свыше 75 км/ч).

3.2. Выявляемость болтовых отверстий вблизи стыкового зазора

Для дальнейшего развития скоростной дефектоскопии весьма важно установить основные причины снижения выявляемости типовых отражателей с увеличением скорости сканирования.

Одной из возможных причин может являться особенность формирования сигналов от болтовых отверстий в зависимости от их расстояния до стыкового зазора рельсов. Как показано нами ранее [17, 18], первые от стыка отверстия¹ по ряду причин озвучиваются хуже, чем остальные. Это вызвано динамическими воздействиями неровностей стыков на акустический блок, частичным уходом контактирующей жидкости в стыковой зазор и худшим состоянием поверхности катания рельсов именно в зоне стыка.

Если со стороны основного металла рельсов данные отверстия озвучиваются полноценно, то со стороны торцов рельсов отверстия озвучиваются не полностью (рис. 6а). Из-за близости первых отверстий к торцам стыкуемых рельсов (расстояние до центров отверстий всего 96 мм для рельсов типа Р65 и 66 мм — для рельсов Р50) зона локации этих отверстий ограничена и на практике составляет всего около 30 — 40 мм. В результате, на отдающем конце рельса «отъезжающий», а на приемном конце «наезжающий» ПЭП не могут полностью озвучивать первые отверстия. На развертке типа В от этих отверстий формируются пачки сигналов, имеющие существенно (в три раза) меньшие условные размеры (рис. 6б).

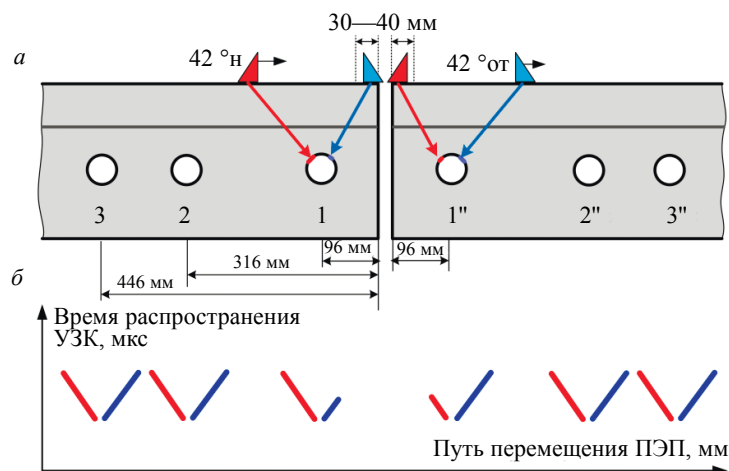


Рис. 6. Озвучивание первых болтовых отверстий наклонными ПЭП:

а — со стороны основного металла рельсов и неполное прозвучивание со стороны торцов рельсов; б — формирующиеся на В-развертке пачки сигналов от всех шести отверстий.

Действительно, если рассмотреть количество обнаруживаемых отверстий с учетом и без учета первых отверстий, то характер поведения линий выявляемости от скорости сканирования заметно меняется (рис. 7).

Как видно (см. рис. 7), основной вклад в ухудшение фиксации болтовых отверстий вносят именно первые отверстия (линия в), изначально озвучиваемые в худших условиях. Без учета отверстий № 1 снижение обнаруживаемости вторых и третьих отверстий при увеличении скорости с 30 до 100 км/ч составляет около 13 % (линия б) при общем снижении качества контроля стыков 20% (линия а).

¹В путевом хозяйстве принято, что номера болтовых отверстий всегда отсчитываются от торца рельса.

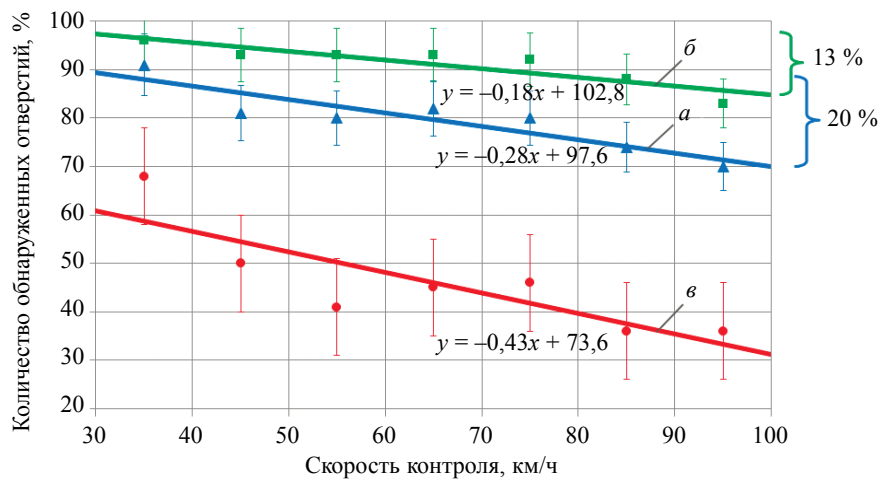


Рис. 7. Зависимость обнаружения болтовых отверстий от скорости:

a — общее количество обнаруженных отверстий; *б* — без учета первых отверстий (вторые и третьи отверстия); *в* — только первые отверстия.

Однако даже эта цифра свидетельствует о том, что при реализации высоких скоростей сканирования может быть пропущено значительное количество дефектов (из потенциальных 100 дефектов — 13 пропусков).

Выявляемость первых отверстий на скорости 100 км/ч составляет всего около 30% (линия *в*), что является весьма неудовлетворительным результатом неразрушающего контроля.

Указанные особенности подтверждают приведенные на рис. 8 фрагменты реальных дефектограмм (комплекса А). Видно, что именно из-за недостаточно полного озвучивания первых отверстий формируется неполная картина фиксации типовых отражателей в зоне стыка.

При скорости 35 км/ч все ПЭП (два наклонных и два прямых) весьма полноценно озвучивают все шесть болтовых отверстий (рис. 8*а*). Но при скорости 95 км/ч из шести отверстий только четыре отверстия можно признать зафиксированными одновременно двумя наклонными ПЭП (рис. 8*б*). Ни один из прямых ПЭП, из-за нарушения акустического контакта (пропадание донного сигнала на рис. 8*б*), не смогли озвучить первое отверстие на принимающем конце и зафиксировали всего четыре отверстия из шести.

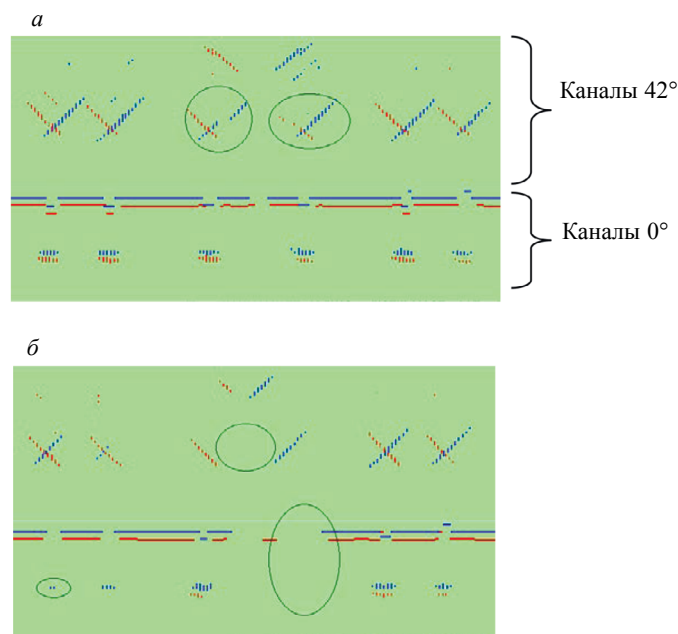


Рис. 8. Ухудшение фиксации первых отверстий на реальных дефектограммах болтовых стыков при скоростях сканирования 35 (*а*) и 95 км/ч (*б*). Выделены участки с неполной записью сигналов от отверстий.

Если отсутствие сигналов наклонных ПЭП при озвучивании первых отверстий вызвано недостаточной (короткой) зоной локации, то отсутствие сигналов прямых ПЭП, излучающих продольные волны под прямым углом, можно объяснить только значительным ухудшением акустического контакта в приторцевой зоне. На принимающем конце также негативно сказывается некоторый «полет» искательной системы после преодоления стыкового зазора.

Анализ показывает, что при озвучивании со стороны торцов рельсов уже на скорости 30 км/ч более половины первых отверстий на отдающем конце рельса не выявляются. Особенно неудовлетворительно фиксируется первое отверстие на принимающем конце рельса как прямыми, так и наклонными ПЭП (даже на скорости 30 км/ч не фиксируется более 60 % отверстий). Эти результаты согласуются с ранее полученными данными в работах [17, 18].

При скоростях сканирования 70—80 км/ч все отверстия вблизи стыкового зазора (100 % отверстий №№ 1 и 1" по рис. 6) полностью не фиксируются со стороны торцов рельсов. Это крайне опасная ситуация, т.к. известно, что трещины в болтовых отверстиях по коду 53.1, как правило, зарождаются именно в ближайших к стыку (в первых) отверстиях (см. рис. 2г, 9а), причем чаще именно на принимающем конце в стыке.

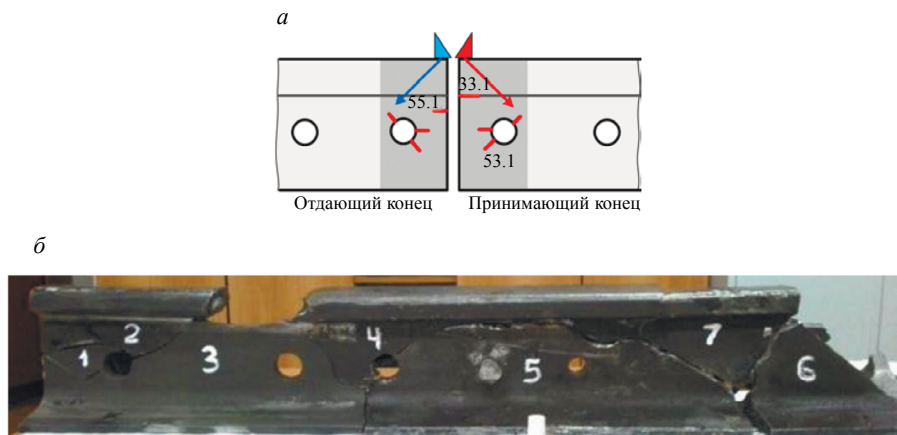


Рис. 9. Проблемные зоны болтового стыка при скоростном контроле рельсов: а — трудновыявляемые дефекты из-за близости к стыковому зазору; б — излом рельса на множество фрагментов из-за необнаруженной трещины в первом отверстии, вызвавшей сход поезда с пути.

По статистике ОАО «РЖД» за последние 5 лет из всех изломов рельсов по дефектам кода 53.1 более 65 % происходили из-за развития трещин именно в первом болтовом отверстии. Случающиеся изломы в болтовых стыках из-за указанных трещин крайне опасны, т.к. при значительном развитии трещины может отколоться целый фрагмент рельса или рельс может развалиться на множество фрагментов (рис. 9б), при этом может произойти сход подвижного состава.

В то же время показатели обнаружения вторых и третьих отверстий могут служить потенциальным показателем качества контроля на бесстыковых участках пути в зоне основного металла рельсов. Данная методика может применяться для оценки допустимых скоростей сканирования на конкретных участках пути и оценки эффективности того или иного дефектоскопического комплекса.

4. АНАЛИЗ УСЛОВНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ СИГНАЛОВ

Для более детального анализа сигналов от типовых отражателей в зависимости от скорости сканирования рассмотрим поведение одного из основных параметров фиксируемых сигналов — условной протяженности отражателя ΔL (по ГОСТ 18576—96). Параметр ΔL , по существу, представляет собой зону локации отражателя по длине рельса в мм на заданной условной чувствительности контроля. На основе этого параметра формируются критерии обнаружения дефектов и обеспечения качества контроля. Так как ΔL является измеряемым параметром отражателя, то подразумевается, что эта величина для данного отражателя должна быть постоянной. Однако, как показано в работе [2], при значительных скоростях V условная протяженность ΔL может менять свое значение, причем тем больше, чем больше скорость контроля.

Вследствие ощутимого сдвига ПЭП за время распространения ультразвуковых колебаний до дефекта и обратно, условный размер дефекта $\Delta L_{\text{дин}}$, измеренный при динамическом режиме ($V > 0$), будет иметь меньшее значение, чем $\Delta L_{\text{ст}}$, определенного при стационарном режиме ($V \approx 0$). Причем относительное изменение $\varepsilon_{\Delta L}$ условной протяженности зависит от угловых параметров ПЭП (угла ввода α и ширины диаграммы направленности 2φ — см. рис. 2а) и, дополнительно, от направления движения ПЭП относительно дефектного сечения:

$$\varepsilon_{\Delta L} = \frac{2V}{c} \cdot \frac{\cos(\alpha_0 \mp \varphi)}{\sin \varphi}, \quad (2)$$

где нижний знак (+) соответствует удалению ПЭП от отражателя, c — скорость поперечной УЗ волны [2]. Согласно (2), условная протяженность отражателя, измеренная «наезжающим» на дефект ПЭП, при прочих равных условиях будет иметь меньшее значение, чем при измерении с «отъезжающим» ПЭП [7]. При идентичных параметрах наезжающего и отъезжающего ПЭП ($\alpha^\circ = 42^\circ$, $\varphi = 4^\circ$) при изменении скорости сканирования от 30 до 100 км/ч условная протяженность отражателя $\Delta L_{\text{дин}}$ для наезжающего ПЭП будет меньше на 6—19 %, а для отъезжающего — на 5—17 % соответственно по сравнению с измеренным в стационарных условиях значением $\Delta L_{\text{ст}}$ (табл. 1).

Таблица 1

Уменьшение (в %) условной протяженности $\Delta L_{\text{дин}}$ дефекта от скорости сканирования по сравнению со значениями, полученными в стационарных условиях ($\Delta L_{\text{ст}}$)

| Направление озвучивания дефекта | Скорость сканирования | |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------|
| | 30 км/ч (8,33 м/с) | 100 км/ч (27,78 м/с) |
| К дефекту («наезжающий» ПЭП) | 5,8 | 19,3 |
| От дефекта («отъезжающий» ПЭП) | 5,1 | 17,0 |

Естественно, такую своеобразную компрессию условной протяженности необходимо учитывать при анализе сигналов высокоскоростного контроля. Уменьшение ΔL в реальных ситуациях на большую величину, чем рассчитанную по (2), свидетельствует и об иных влияющих на измеряемый параметр причинах.

На рис. 10 показано усредненное (по наезжающему и отъезжающему каналам с углом 42°) значение условной протяженности сигналов ΔL (зоны локации отражателя по длине рельса в мм) от разных болтовых отверстий (считая от торца). Как и следовало ожидать, третьи и вторые отвер-

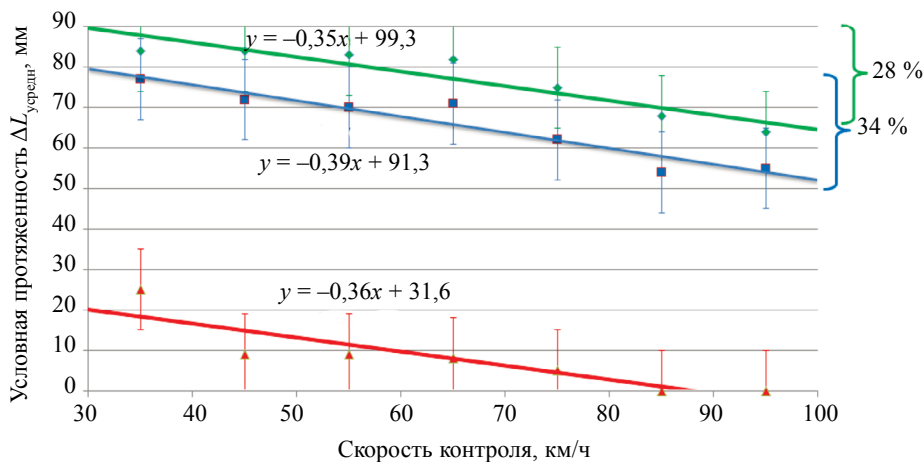


Рис. 10. Уменьшение условной протяженности ΔL (в мм) сигналов от разных отверстий для наклонных ПЭП 42° при увеличении скорости контроля.

ствия озвучиваются (с обеих сторон) примерно одинаково, поэтому они объединены в единую зависимость (линия зеленого цвета на рис. 10).

Для первых болтовых отверстий на рис. 10 приведены две зависимости: при полноценном озвучивании отверстия со стороны основного металла (линия синего цвета) и при неполноценном контроле со стороны торца рельса (линия красного цвета).

Первые отверстия с «удобной» стороны формируют пачки сигналов с несколько меньшей (примерно на 5 %) условной протяженностью, чем третьи отверстия, и, с учетом близости к стыковому зазору, являются вполне полноценными пачками сигналов. Однако значение ΔL при озвучивании первых отверстий со стороны торца в 4—6 раз (!) меньше, чем со стороны основного металла. Параметр ΔL не удовлетворяет условиям обнаружения по Положению о расшифровке уже на скорости 35 км/ч (см. рис. 10). Этот факт требует дополнительных исследований и поиска технических решений по повышению качества контроля приторцевых участков рельсов, а также корректировки НТД, определяющих браковочные признаки дефектов при высокоскоростном контроле рельсов.

В то же время, общая тенденция изменения среднего значения условной протяженности при увеличении скорости сканирования сохраняется для всех отверстий. На скорости 100 км/ч значение ΔL для указанных отверстий уменьшается примерно на 30—35 % по сравнению со скоростью 30 км/ч.

5. АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Предусмотренная в НТД оценка браковочных уровней по величине условного размера ΔL учитывает только один из возможных параметров пачки эхосигналов: зону фиксации эхосигналов от отражателя по длине рельса. Однако весьма важным параметром является и амплитуда каждого эхоимпульса в группе сигналов и количество УЗ каналов, среагировавших на искомый отражатель.

Для полноценного анализа сигналов от отражателей в рельсах с учетом всех факторов ранее [9] нами предложен обобщающий (интегральный) показатель K_{int} анализируемого отражателя.

Интегральный показатель K_{int} представляет собой линейную комбинацию отдельных показателей K_n , $n = 1, \dots, M$, в M дефектоскопических каналах комплекса, зафиксировавших сигналы от дефекта:

$$K_{\text{int}} = \sum_{n=1}^M a_n K_n, \quad (3)$$

где $0 \leq a_n \leq 1$ — весовой коэффициент канала n ($\sum_{n=1}^M a_n = 1$).

Показатель K_n в отдельном канале определяется выражением:

$$K_n = \frac{l \cdot (U_1 + U_2 + \dots + U_N)}{m_n} = \frac{l \cdot \sum_{i=1}^N U_i}{m_n}, \quad (4)$$

где N — количество принятых эхоимпульсов в пачке (в одном канале); U_i — амплитуда i -го эхосигнала в пачке; l — шаг сканирования по длине рельса; m_n — максимально возможный сигнал от дефекта для нормирования показателя K_n ($0 \leq K_n \leq 1$).

Интегральный показатель позволяет не просто зафиксировать количество сигналов от отражателей, а оценить качество получаемых сигналов с учетом амплитуды всех эхоимпульсов и условной протяженности каждой пачки, принятых от искомого отражателя по мере сканирования рельсов одновременно по всем каналам дефектоскопа.

На рис. 11 показано ухудшение интегральных (усредненных по всем каналам с углами 42 и 0°) показателей K_{int} для разных отверстий в стыке при увеличении скорости контроля. Как видно, показатели качества от всех отверстий синхронно ухудшаются в среднем на 55 % (на 45—65%) при изменении скорости с 30 до 100 км/ч.

При детальном анализе качества сигналов (показателя K_n) от первых отверстий отдельно в каналах с углом 42° (рис. 12) видно, что первые отверстия даже при озвучивании со стороны основного металла фиксируются на 15 % слабее, чем третьи отверстия. При их озвучивании со стороны торцов рельсов качество получаемых сигналов многократно хуже.

Сравнивая зависимости на рис. 10 и 12, можно отметить, что для третьих и первых отверстий, прозвучиваемых со стороны основного металла, с увеличением скорости с 30 до 100 км/ч показатель K_n падает более круто (на 40—65 %) по сравнению с условной протяженностью сигналов ΔL

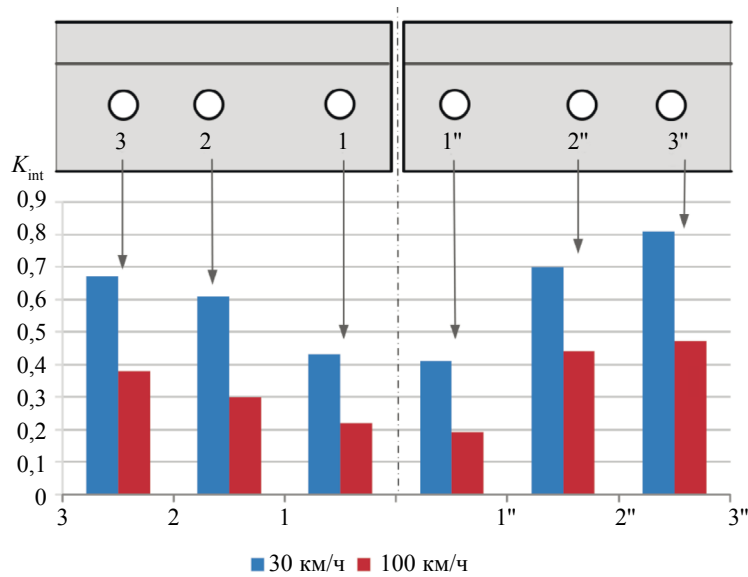


Рис. 11. Изменение интегрального показателя K_{int} отверстий в болтовом стыке (суммарно по каналам с углами 42° и 0°) для скоростей 30 и 100 км/ч.

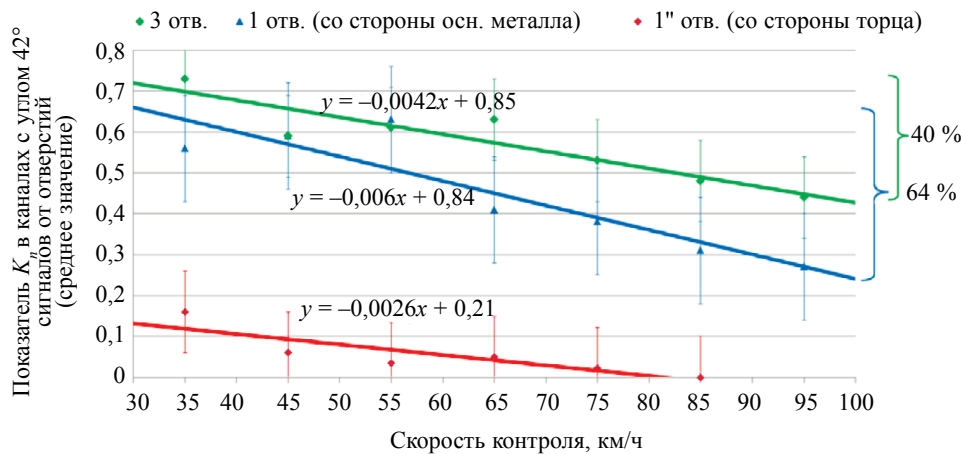


Рис. 12. Изменение показателя K_n сигналов от третьего и первого болтовых отверстий при озвучивании их наезжающим и отъезжающим ПЭП с углами 42° .

(на 30—35%). Это свидетельствует о заметном уменьшении не только количества регистрируемых экосигналов, но и об уменьшении их амплитуд.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С развитием высокоскоростного движения будут расти и требования к контролю рельсов на скоростях, близких к скоростям движения графических поездов. Задачи создания высокоскоростных средств дефектоскопии и методологии оценки их эффективности безусловно будут актуальны в ближайшие годы.

Из результатов проведенных исследований видно, что при анализе качества контроля рельсов и формулировке требований к этому качеству зону болтовых стыков необходимо разделить на две: зону первых болтовых отверстий и зону вторых и третьих отверстий.

Можно предположить, что закономерности изменения сигналов от скорости сканирования во второй зоне идентичны и для основного металла рельсов. Поэтому, не отрицая необходимость проведения тестовой эксплуатации высокоскоростных комплексов на специально подготовленных испытательных участках, методику оценки работоспособности и эффективности мобильных средств по фиксации сигналов от болтовых отверстий (вторых и третьих отверстий) на заявляемых

скоростях контроля можно рекомендовать как быстрый и малозатратный метод испытаний. Предложенную экспресс-методику можно использовать для оценки эффективности того или иного дефектоскопического комплекса рельсов и определения допустимых скоростей сканирования на участках пути разной категории.

Резкое снижение качества озвучивания приторцевой зоны болтовых стыков (зоны первых отверстий) с увеличением скорости сканирования, видимо, вызвано одновременно проявляющимися несколькими факторами:

недостаточной зоной озвучивания со стороны торца (3—4 см);
неровностями и повреждениями поверхности катания в зонах стыковки двух рельсов;
неравномерным упругим прогибом рельсов на болтовых стыках под ходовой тележкой вагона. Работы по детальному изучению этих причин путем математического моделирования динамического взаимодействия искательной системы и неровностей болтового стыка уже начаты.

Параллельно, с учетом уже выявленного фактора недостаточной зоны озвучивания со стороны торца, требуется разработать специальную схему прозвучивания зоны первых болтовых отверстий с максимальным отдалением излучающе-приемных преобразователей от торцов рельсов. Ранее для улучшения качества контроля в этой зоне было предложено использовать колесные УЗ преобразователи с упругими оболочками [19]. Они действительно решают проблему при скоростях до 30—55 км/ч. Однако при более высоких скоростях возникают весьма сложные технические проблемы [20, 21], несмотря на значительные финансовые и временные затраты, не поддающиеся решению уже много лет ведущим фирмам мира, занимающимся рельсовой дефектоскопией. Одним из вариантов схем может явиться применение продольных волн при наклонном вводе ультразвуковых колебаний с одновременным использованием эхо и зеркально-теневых методов с дополнительным анализом огибающей последовательности донных сигналов [22].

Наиболее информативными, с точки зрения оценки качества озвучивания типовых отражателей, являются не отдельные параметры ультразвуковых сигналов (количество обнаруженных отверстий, ΔL , N , U), а интегральный показатель K_{int} анализируемого отражателя. Поэтому и оценку качества озвучивания рельса при разных скоростях контроля необходимо выполнять с его использованием.

Качество обнаружения сигналов от типовых отражателей с увеличением скоростей сканирования от 30 до 100 км/ч снижается на 45—65 %. Этот факт необходимо учитывать при оценке достоверности контроля на высоких скоростях сканирования и при определении стратегии обеспечения безопасности движения поездов путем выбора оптимальной периодичности и скоростей контроля. Поэтому выбор обоснованной скорости сканирования является компромиссом между производительностью и достоверностью контроля (быстро, но не слишком качественно, или контроль с меньшей производительностью, но эффективнее).

Настоящие исследования являются предварительными, полученными при анализе сигналов контроля главных путей в зимне-весенний (февраль—апрель) период. С целью выработки предложений по разработке нормативных требований контроля с обоснованием допустимых скоростей сканирования и для других категорий рельсовых путей целесообразно продолжить исследований в более широком диапазоне условий их эксплуатации.

ВЫВОДЫ

1. Показано заметное снижение качества ультразвукового контроля железнодорожных рельсов с увеличением скорости сканирования. Этот факт необходимо учитывать при определении стратегии обеспечения безопасности движения поездов путем принятия компромиссного решения между производительностью и качеством контроля.

2. Рассмотрены причины уменьшения значений основных параметров эхосигналов от болтовых отверстий на больших скоростях сканирования.

3. Введение новых технических решений в скоростных системах контроля позволило повысить качество обнаружения болтовых отверстий до допустимого для высоких скоростей уровня.

4. Предложенную методику оценки качества контроля по степени выявляемости болтовых отверстий можно использовать для экспресс-оценки достоверности контроля рельсов при высоких скоростях сканирования.

5. Показана необходимость разработки новых методов или схем прозвучивания для контроля весьма опасного участка болтового стыка — приторцевых зон рельсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thomas H.-M., Heckel T., Hanspach G.* Advantage of a Combined Ultrasonic and Eddy Current Examination for Railway Inspection Trains // *Insight*. 2007. No 49 (6). P. 341—344.
2. *Марков А.А.* Особенности оценки условных размеров дефектов при значительных скоростях сканирования // *Дефектоскопия*. 1989. № 3. С. 8—11.
3. *Orjelic V., Aharoni R., Krug G.* Comparative Data Analysis for Optimal High-Speed Railways Testing / 8th European Conference on NDT (ECNDT 2002). 2002. Barcelona (Spain).
4. *Тарабрин В.Ф.* Реализация скоростной комплексной диагностики железнодорожной инфраструктуры // *Евразия вести*. 2018. № 9. С. 5—6.
5. *Лужин С.В., Лужин В.С., Бондаренко А.А.* Повышение эффективности ведения путевого хозяйства // *Путь и путевое хозяйство*. 2017. № 4. С. 34—37.
6. *Марков А.А., Кузнецова Е.А.* Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 2. Расшифровка дефектограмм. С-Пб.: Ультра Принт, 2014. 332 с.
7. *Волков И. Ю., Зверев А.А.* Опыт эксплуатации вагона дефектоскопа АВИКОН-03М // *Путь и путевое хозяйство*. 2019. № 8. С. 7—10.
8. *Paraelias M., Roberts C., Davis C.* A review on non-destructive evaluation of rails: State-of-the-art and future development // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2008. V. 222. No 4. P. 367—384.
9. *Markov A.A., Maksimova E.A., Antipov A.G.* Analyzing the Development of Rail Defects Based on Results of Multichannel Periodic Testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55 No. 12. P. 875—886. [*Марков А.А., Максимова Е.А., Антипов А.Г.* Анализ развития дефектов рельсов по результатам многоканального периодического контроля // *Дефектоскопия*. 2019. № 12. С. 3—15.]
10. *Мосягин В.В., Васильев С.А., Маховиков С.П.* Способ высокоскоростного ультразвукового контроля рельсов / Патент на изобретение № 2715885. Оpubл. 04.03.2020. Бюл. № 7.
11. *Тарабрин В.Ф., Юрченко Е.В., Анисимов В.В.* и др. Способ высокоскоростного ультразвукового контроля рельсов / Патент на изобретение № 2440568. Оpubл. 20.01.2012. Бюл. № 2.
12. *Тарабрин В.Ф., Чистякова О.Е., Кисляковский О.Н., Кононов Д.А.* Автоматическая регулировка чувствительности каналов дефектоскопа с использованием адаптивного порога // *В мире неразрушающего контроля*. 2016. Т. 19. № 3. С. 77—80.
13. *Тарабрин В.Ф., Одынец С.А., Чистякова О.Е.* и др. Способ ультразвукового контроля / Патент на изобретение № 2662464. Оpubл. 26.07.2018. Бюл. № 21.
14. *Antipov A.G., Markov A.A.* 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection // *NDT & International*. 2018. V. 98. No. 9. P.177—185.
15. *Antipov A.G., Markov A.A.* Detectability of Rail Defects by Magnetic Flux Leakage Method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55 No. 4. P. 277—285. [*Антипов А.Г., Марков А.А.* Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом // *Дефектоскопия*. 2019. № 4. С. 21—29.]
16. *Марков А.А., Максимова Е.А.* Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2019. Т. 22. № 2. С. 22—32.
17. *Марков А.А., Захарова О.Ф., Мосягин В.В.* Применение развертки типа «В» для обнаружения трещин в зоне отверстий болтовых стыков железнодорожных рельсов // *Дефектоскопия*. 1999. № 6. С. 78—92.
18. *Марков А.А., Гараева В.С.* Об акустическом контакте в зоне болтовых стыков // *Путь и путевое хозяйство*. 2008. № 12. С. 15—17.
19. *Марков А.А., Олейник В.Е.* Ультразвуковой контроль ответственных объектов с помощью колесных преобразователей с эластичным протектором // *MEGATECH*. 2012. № 4. С. 18—23.
20. *Марков А.А.* Зарубежные системы контроля рельсов: зарубежная техника // *Путь и путевое хозяйство*. 2010. № 9. С. 32—40.
21. *Тарабрин В.Ф.* Сопоставление характеристик искательных систем мобильных средств дефектоскопии рельсов // *Контроль. Диагностика*. 2020. Т. 23. № 10. С. 40—48.
22. *Молотков С.Л., Мосягин В.В., Марков А.А., Иванов Г.А.* Применение продольных волн при наклонном вводе ультразвуковых колебаний для повышения эффективности дефектоскопии рельсов / Тезисы XXII Всероссийской конф. по НК и ТД. М. 3—5.03.2020.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

© 2021 г. Борис Велев^{1*}, Иван Иванов², Владимир Каменов^{3,**}

¹Институт механики, София, 1000 Болгария

²Институт национальной и мировой экономики, София, 1000 Болгария
³Софийский технический университет, София, 1000 Болгария

E-mail: * boris_velev81@abv.bg; ** vladokamenov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.09.2020; после доработки 12.01.2021

Принято к публикации 29.01.2021

Представлены два оптимизированных модульных устройства: MULTITEST-MC010 для исследования ферромагнитных материалов методами измерения магнитного шума и магнитоакустической эмиссии эффекта Баркгаузена и MULTITEST-CD010 для исследования металлических материалов методами измерения скорости C и затухания ультразвука. Исследовано влияние структуры в конструкционной стали 40X на числовые характеристики магнитного шума и магнитоакустической эмиссии Баркгаузена — напряжения магнитного шума E_{BN} и напряжения среднеквадратичной акустической эмиссии E_{MAE} . Структура и механические свойства образцов чугуна с комплексным измерением информационных параметров E_{BN} , E_{MAE} и C были исследованы при одновременном использовании двух модульных устройств системы. Доказана возможность комплексного применения этих параметров для неразрушающего контроля конструкции после термической обработки в конструкционной стали 40X и прочности на разрыв в образцах чугуна.

Ключевые слова: комплексный неразрушающий контроль, неразрушающие информационные параметры.

DOI: 10.31857/S0130308221030027

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышенные требования к качеству и надежности машиностроительных продуктов и сооружений вызывают необходимость исследования, разработки и внедрения в промышленность сложных систем для неразрушающего контроля физико-механических свойств, механических напряжений и структуры материалов [5, 6, 8, 10]. Комплексное исследование и оценка свойств материалов и изделий происходит через одновременное использование нескольких неразрушающих методов, что сочетают и взаимно дополняют их возможности [8, 9, 11, 12]. Для осуществления комплексного неразрушающего контроля в практических целях необходимо использовать методы статистического анализа и современные программные продукты [1]. Для этой цели разработана модульная автоматизированная система MULTITEST для неразрушающего контроля и исследования структуры, состава и физико-механические свойств материалов в лабораторных и производственных условиях. Она основана на комплексном использовании нескольких физических методов (магнитные, акустические, электрические), поэтому каждый из них можно использовать самостоятельно [2—5, 8].

2. ЦЕЛЬ

Целью данной работы является представление основных принципов и алгоритмов автоматизированной оценки данных комплексного неразрушающего контроля с помощью модульных устройств автоматизированной системы: модульным устройством для магнитного и магнитоакустического контроля ферромагнитных материалов MULTITEST-MC010 и модульным устройством MULTITEST-CD010 для комплексного контроля материалов с методами измерения скорости и затухания ультразвука [4, 8]. Для апробации системы необходимо провести исследования и разработать методики комплексного неразрушающего контроля образцов конструкционной стали и чугуна; сделать анализ результатов и выводы о применимости комплексного неразрушающего контроля.

3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Основной принцип комплексного неразрушающего контроля заключается в том, что практическая целесообразность увеличения параметров неразрушающего контроля информации опре-

деляется вероятностью правильной оценки свойств контролируемых образцов или материалов, классифицированных по одному информационному параметру, и сравнивается с вероятностью правильного оценивания материалов, классифицированных посредством двух или более информационных параметров. Логично, что при получении недостаточной информации о контролируемом материале или изделии с применением только одного метода, использование правильно выбранного второго метода увеличит вероятность правильной оценки свойств материала [7, 8]. Для оценки этой вероятности данные неразрушающего контроля подвергаются статистической обработке [1].

3.1. Автоматизированная система обработки данных и для измерений/ испытаний в комплексном неразрушающем контроле

Разработка автоматизированной системы обработки и оценки экспериментальных данных является первым шагом на пути к разработке методологий комплексного неразрушающего контроля. Он охватывает следующие шаги:

- Расчет средних значений и интервальных оценок серий измерений, выполненных по одному, двум или более неразрушающим информационным параметрам.
 - а) Однопараметрическая интервальная оценка.
 - б) Многопараметрическая интервальная оценка.
- Критерии классификации.
 - а) Система предварительного обучения с использованием сравнительных образцов.
 - б) Системы самообучения.
- Программное обеспечение для автоматической обработки данных для классификации образцов и деталей по группам с одинаковыми свойствами.

3.1.1. Алгоритмы автоматической обработки данных и классификации образцов и деталей по группам с одинаковыми механическими свойствами или структурой

Однопараметрическая оценка интервала.

Если у нас есть n измерений на контролируемом материале одного неразрушающего информационного параметра $\{x_i; i = 1, \dots, n\}$, тогда оценка в этом случае:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

интервальная оценка для вероятности P_r :

$$\bar{x} \pm c(P_r)s, \quad (2)$$

где s — стандартное отклонение:

$$s = \left[\frac{1}{n-1} \left(\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$c(P_r)$ — поправочный коэффициент с учетом малого размера выборки:

$$c(P_r) = \frac{1}{\sqrt{n}} (t_{q,v}); \quad n-1, \quad (4)$$

где $t_{q,v}$ — квантиль распределения Стьюдента; $q = \frac{1+P_r}{2}$; $v = n-1$.

Значения $t_{q,v}$, q и v могут быть аппроксимированы с достаточной точностью для практики:

$$t_{q,v} = \lambda_q + \sum_{i=1}^4 \frac{q_i(\lambda_q)}{v^i}; \quad \lambda_q = r - \frac{\left(\sum_{k=0}^2 c_k \cdot r^k \right)}{\left(\sum_{k=0}^3 d_k \cdot r^k \right)}; \quad r = \sqrt{l_n \frac{1}{q^2}}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} c_0 &= 2,30753; & d_0 &= 1; \\ c_1 &= 0,27061; & d_1 &= 0,99229; \\ c_2 &= 0; & d_2 &= 0,04481. \\ d_3 &= 0; \end{aligned}$$

Аппроксимация позволяет определить квантили $t_{q,v}$ и соответствующие интервальные оценки для числа измерений n и вероятности P_r .

Оценка многопараметрического интервала.

Если у нас есть измерения $x_{ij}^{(k)}$, где $1 \leq i \leq n_k$; $1 \leq j \leq \rho$; $1 \leq k \leq m$; ρ — количество параметров; n_k — количество измерений на образце; m — количество образцов, то балльная оценка в этом случае:

$$\bar{x}_j^{(k)} = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} x_{ij}^{(k)}, \quad (6)$$

интервальная оценка:

$$\bar{x}_j^{(k)} \pm c(P_r) \cdot s_j^{(k)}; \quad j = 1 \dots \rho; \quad k = 1 \dots m, \quad (7)$$

где $c(P_r)$ — поправочный коэффициент:

$$c(P_r) = \left[\frac{(n_k - 1)\rho}{(n_k - \rho)n_k} Fq_{k-2}^n \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Аппроксимация (5) может быть принята для аппроксимации t -распределения. В интервальной оценке (7) стандартное отклонение обозначается как

$$S_j^{(k)} = \left[\frac{1}{n_k - 1} \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ij}^{(k)} - \bar{x}_j^{(k)})^2 \right]^{1/2}. \quad (9)$$

Например, если у нас есть три параметра $j = 1, 2, 3$, то 3 — интервал для j -го параметра этой группы выборки определяется выражением:

$$v_{(r)}^{(j)} = m_k^{(j)} + 3\sigma_k^{(j)}; \quad v_{(\Delta)}^{(j)} = m_k^{(j)} - 3\sigma_k^{(j)}; \quad k=1, 2, 3, \quad (10)$$

где $v_{(r)}^{(j)}$ — верхнее предельное значение; $v_{(\Delta)}^{(j)}$ — нижнее предельное значение.

Критерии классификации.

Анализ теоретических допущений показывает, что при формировании критериев могут применяться следующие системы распознавания:

а) система предварительного обучения с использованием сравнительных образцов. Они образуют характерные области с доверительными интервалами с определенной степенью вероятности. Такая система является многопараметрической системой дисперсионного анализа, чьи однопараметрические и многопараметрические интервальные оценки представлены выше. После расчета доверительных интервалов начинается классификация незнакомых образцов или деталей по соответствующим группам сравнительных образцов. Критерием является среднее нескольких независимых измерений. На практике с помощью этой системы для материала производится 2-5 независимых измерений каждого параметра неразрушающей информации, рассчитывается среднее значение измерений и, если оно находится в пределах доверительного интервала $\bar{x} \pm 3\sigma$, материал (деталь) принадлежит соответствующей группе. Другой системой обработки данных являются надежные (робастные) интервальные оценки [1];

б) самообучающиеся системы. При классификации сравнительно небольшого числа выборок или деталей наборы данных невелики, и в этом случае нецелесообразно применять вероятностный подход к сравнительным выборкам. Методы анализа данных, основанные на сходстве измерений, являются более подходящими. Такая система самообучения является кластерным анализом [1]. Кластерный анализ особенно подходит для измерений с высоким рассеянием, таких как многие методы неразрушающего контроля.

3.1.2. Алгоритмы для автоматизированного комплексного неразрушающего контроля

Для каждого модульного прибора алгоритм настройки самостоятельный [6, 7]. Чтобы установить корреляционные зависимости между безразрушительными информационными характеристиками, структурой и механическими свойствами контролируемых материалов, а также сформировать критерий для классификации, разработаны алгоритмы и софтвер в следующей последовательности.

Алгоритм для модульного прибора MULTITEST-MC010. Это устройство, которое измеряет неразрушающие информационные параметры магнитного шума и магнитоакустической эмиссии Баркгаузена — магнитное шумовое напряжение E_{BN} и магнитоакустическое напряжение E_{MAE} . Из

них получают зависимости $E_{BN} = F(I_B)$ и $E_{MAE} = F(I_B)$ для нескольких групп сравнительных образцов контролируемого материала при произвольно выбранной величине намагничивающего тока I_B . Полученные зависимости аппроксимируются функцией вида:

$$E_{BN} = (a_k f_B^2 + b_k f_B + c_k)^{-1}. \quad (11)$$

Из зависимостей (11) определяется оптимальная частота $f_{\text{опт}}$. При этой частоте определяются зависимости шумового напряжения E_{BN} тока намагничивания $I_B = E_{NB}(I_B)$ [5]. Полученные зависимости аппроксимируются функцией:

$$E_{BN} = a_k \exp\{b_k [\exp(c_k I_B)]\}. \quad (12)$$

Эти зависимости аппроксимируются функцией по следующему алгоритму.

а) Определяется оптимальная частота и оптимальный намагничивающий ток. Зависимости (11) аппроксимируются квадратным уравнением:

$$f_B^2 + af + c = 0, \quad (13)$$

корни которого представляют оптимальную частоту $f_{\text{опт}}$ и на основе этих частоты получают зависимости $E_{BN}(I_B)$ для групп сравнительных образцов. Эти зависимости аппроксимируются нелинейным уравнением:

$$\exp[\varphi_l(I_B^{(1)})] - A \exp[\varphi_l(I_B^{(2)})] = 0. \quad (14)$$

б) Из уравнения (14) находится максимальный диапазон между величинами аппроксимированных данных и из них определяется оптимальная величина намагничивающего тока $I_{\text{опт}}$. При этом токе измеряют реальные образцы незнакомыми структурно-механическими характеристиками. Аналогичную процедуру проводят для оптимизации измерений зависимостями $E_{MAE}(f_B)$, $E_{MAE}(I_B)$, чтобы найти оптимальную частоту и оптимальный намагничивающий ток магнитоакустического напряжения E_{MAE} , при котором делается измерение реальных образцов незнакомой структуры или механическими свойствами.

Алгоритм для модульного прибора MULTITEST-C010. В этом устройстве используется метод измерения скорости и затухания ультразвука в твердых материалах с помощью одного измерения, которое одновременно определяет фактическую толщину контролируемого материала и траекторию ультразвука в нем. Обе величины обрабатываются, и скорость или затухание ультразвука в материале указывается на цифровом индикаторе [7]. Основные этапы настройки и калибровки MULTITEST-CD010:

$$d_{ye1} = d_{oe1} = d_{e1} \text{ и } d_{ye2} = d_{oe2} = d_{e2}, \quad (15)$$

где d_{e1} , d_{e2} — фактическая толщина измеренных двух секций эталона [7]; d_{oe1} , d_{oe2} — толщина тех же двух секций, измеренная с помощью оптоэлектронного датчика; d_{ye1} , d_{ye2} — относительная толщина тех же двух секций, измеренная ультразвуком. Следующая формула используется для расчета скорости ультразвука:

$$C = k(d_y / d_o) C_e. \quad (16)$$

б) Для коэффициента затухания на данной частоте δ_t используют формулу:

$$\delta_t = \frac{(A_1 - A_n) - B}{2d_0(n_1 - n_n)}, \quad (17)$$

где C_e , м/с — скорость ультразвука в эталоне изготовлен из армко-железа [3,7]; k — коэффициент пропорциональности с учетом внешних условий; d_y , мм — относительная толщина материала, измеренная ультразвуком; d_0 , мм — фактическая толщина, измеренная с помощью оптоэлектронного датчика; δ_t , дБ / мм — коэффициент затухания на частоте t ; n_1 и n_2 — номера сравниваемых эхоимпульсов; A_1 , A_n — амплитуды сравниваемых ультразвуковых эхоимпульсов. В настоящем исследовании разрушающий информационный параметр (продольная скорость ультразвука C для простоты) представляется как безразмерное отношение скоростей M в контролируемом материале и в эталонном железе. Для $k = 1$ (см. (16)) $M = C / C_e = d_y / d_e$. Отношение M позволяет только

путем измерения толщины, без расчета скорости ультразвука, регистрировать с достаточной точностью изменение скорости ультразвука в разных материалах. Этот параметр выбирается в качестве дополнительного параметра и измеряется в соответствии с программой измерений/ испытаний и методикой калибровки [4].

3.1.3. Софтвр

Для автоматизированной системы комплексного неразрушающего контроля разработана софтверная программа для сбора, анализа и оценки экспериментальных данных, а также программное обеспечение для измерения/тестирования для каждого из модульных устройств в соответствии с алгоритмами, описанными выше. Для программного обеспечения используются системы программирования: MatLab для оценки данных и измерения /тестирование компонентов системы и графической программы LabView для онлайн визуализаций результатов. Апробированы неразрушающие информационные параметры — напряжения магнитного шума E_{BN} , магнитоакустическое напряжение E_{MAE} и продольная скорость ультразвука C (или отношение скоростей M) в образцах и изделиях из машиностроительных материалов. Система апробирована данными, полученными модульным прибором MULTITEST-MC010 и MULTITEST-CD010. Измерения проведены на сравнительных образцах из конструкционной стали 40X и литейного чугуна.

4. АППАРАТУРА, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Аппаратура

Автоматизированная система MULTITEST состоит из 3-х частей: персональный компьютер для автоматической обработки и оценки данных контроля и управления приспособлениями, модульные приборы для измерения безразрушительных информационных параметров и приспособлений (измерительные клещи, манипуляторы) для захвата и перемещения, а так же классификации измеряемых образцов, изделий и материалов. Модульные приборы имеют автономное питание и могут работать самостоятельно или в единой автоматизированной системе в зависимости от поставленных задач. На рис.1 показана фотография конфигурации системы с модульным прибором MULTITEST-MC010, MULTITEST-CD010 и измерительные клещи DK100.



Рис. 1. Внешний вид системы с конфигурацией — тест-клещи DK100, MULTITEST-MC010 и MULTITEST-CD010.

4.2. Материалы

Чтобы установить корреляционные зависимости между безразрушительными информационными характеристиками, структурой и механическими свойствами контролируемых материалов, необходимо сделать сравнительные образцы. Для апробации системы подобраны сравнительные образцы из конструкционной стали 40X и литейный чугун. Образцы плоскопараллельные с размерами $\Phi 30 \times 20$ мм с различной степенью термообработки, выполненной в инертной среде CO_2 , включая по 5 штук в каждой группе. Сравнительные образцы серого чугуна и высокопрочного

Механические свойства сравнительных образцов стали и чугуна

| Группы образцов стали 40X | | Группы образцов из чугуна ВЧ и СЧ | | |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|---|--------|
| № | Твердость <i>HV</i> | № | Прочность на растяжение <i>Rm</i> , МПа | |
| 1 | 380—410 | 1 | 120—157 | СЧ15 |
| 2 | 360—390 | 2 | 300—337 | СЧ30 |
| 3 | 330—365 | 3 | 450—500 | ВЧ50 |
| 4 | 300—310 | 4 | 590—630 | ВЧ60 |
| 5 | — | 5 | 640—675 | ВЧ60-2 |

чугуна также имеют размеры $\Phi 30 \times 20$ мм, по 5 в каждой группе и имеют различную прочность на разрыв. Принадлежность сравнительных образцов к соответствующей группе с такими же механическими свойствами была подтверждена химическим и металлографическим анализом и механическими испытаниями прочности на растяжение и прочности на разрыв. Тип термообработки и данные твердости по Бринеллю для образцов из стали 40X и предел прочности при растяжении в образцах чугуна приведены в табл. 1.

4.3. Методика для комплексного неразрушающего контроля

Для испытаний прибора и системы обработки и оценки данных была разработана специальная методика неразрушающего контроля твердости (термической обработки) образцов из конструкционной стали 40X и прочности на растяжение образцов из чугуна.

Объект комплексного неразрушающего контроля. Объектами контроля являются образцы и детали конструкционной стали 40X и чугунных колесиков размером $\Phi 30 \times 20$ мм.

Оборудование и аксессуары:

устройства MULTITEST-МС 010, MULTITEST-CD010;

аксессуары — испытательные клещи DK100. Для применения комплексного неразрушающего контроля магнито-шумовыми и ультразвуковыми методами для калибровки и измерения используются специально разработанные измерительные зажимы DK100 (см. рис. 1);

персональный компьютер (ноутбук);

магнитные шумовые преобразователи и ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи; серия сравнительных образцов с различной термообработкой и прочностью на растяжение (см. табл. 1);

необходимая документация и программное обеспечение для системы (инструкция по эксплуатации, база данных, методы калибровки и тестирования и т. д.).

Подготовка сравнительных образцов.

В каждой группе было отобрано 5 образцов с одинаковыми свойствами (см. табл. 1); подготовка последовательно включает в себя следующие операции — токарная обработка, запись, предварительная настройка и выборка. Отобранные образцы подвергаются термической обработке, пескоструйной очистке, квантово-химическому анализу, определению средней твердости *HV* из 3 независимых измерений.

Измерение параметров неразрушающей информации образцов, в соответствии с разработанным программным обеспечением и алгоритмами, описанными выше, для формирования характеристичных областей, а также с помощью программного обеспечения для измерений / испытаний в условиях комплексного неразрушающего контроля [8].

В этом случае используется только часть алгоритма, представленного в разделе 3.1.2, — только зависимости параметров неразрушающей информации от тока намагничивания $E_{BN} = F(I_B)$ и $E_{MAE} = F(I_B)$ из (14). Частота магнитного шума f_{BN} измеряется в общем диапазоне частот (1—100) кГц, а частота магнитного шума f_{MAE} — (10—200) кГц.

Для третьего дополнительного неразрушающего информационного параметра определяется продольная скорость ультразвука *C* в (16), которая для простоты представляется в виде безразмерного отношения скоростей *M* в контролируемом материале и в эталоне [4].

Определение критерия классификации. Для E_{BN} и E_{MAE} , которые являются основными информационными параметрами, в качестве критерия используется максимальное расстояние семейств

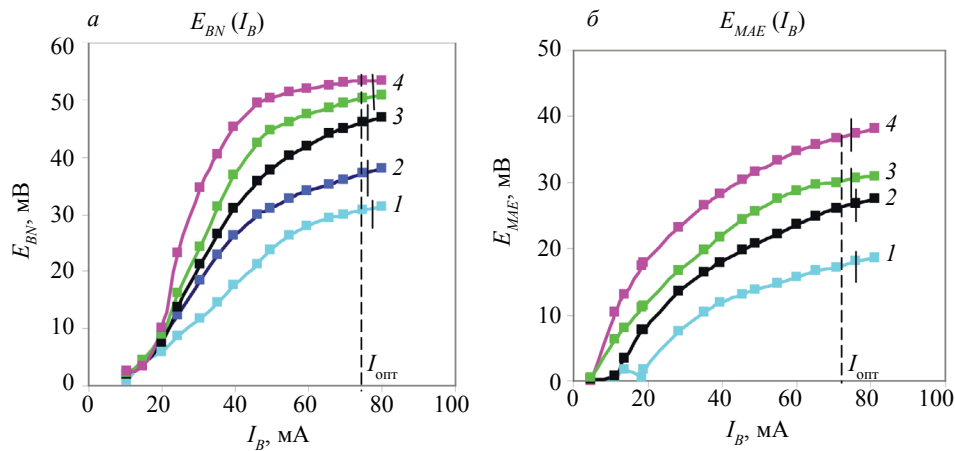


Рис. 2. Однопараметрические доверительные интервалы серий кривых $E_{BN}(I_B)$ и $E_{MAE}(I_B)$ групп сравнительных образцов из стали 40X.

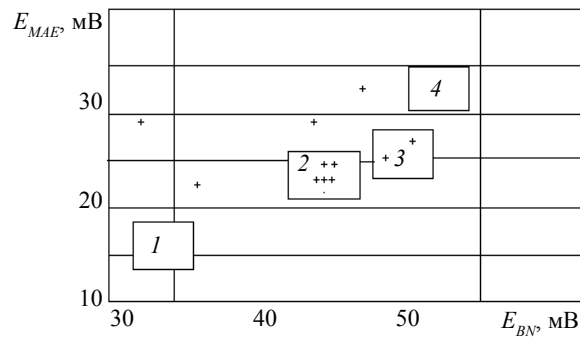


Рис. 3. Характеристические области стальных образцов. Информационные параметры — E_{BN} и E_{MAE} .

кривых от сравнительных выборок (рис. 2). Они определяют оптимальный рабочий ток $I_{\text{опт}}$ и определяются характеристические области (рис. 3). Используя информационный параметр M , формируются трехпараметрические характеристические области (рис. 5).

Графическая визуализация и запоминание характеристических областей.

Подготовка к комплексному неразрушающему контролю реальных деталей.

После определения характерных областей и критерия классификации групп сравнительных выборок начинается измерение реальных деталей. Подготовка к измерению включает в себя:

определение соответствия партии и марки деталям, подлежащим проверке, и их соответствие знаку контрольных образцов;

очистка деталей пескоструйной машины.

Метод измерения.

Для измерения E_{BN} и E_{MAE} контролируемой детали с помощью прибора DK100, показанного на рис. 1, он прижимается к преобразователю магнитного шума и пьезоэлектрическому преобразователю с постоянной силой P . Для измерения M используется то же устройство DK100 [7].

Параметры неразрушающей информации определяются на основе 3-5 независимых измерений каждой контролируемой части. Контролируемые детали классифицируются на группы с одинаковыми механическими свойствами (твёрдостью или пределом прочности) с определенной степенью вероятности.

Распечатать результаты.

Для каждого случая аналогичная методология делается для другого материала или продукта.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно методике, подготовленные сравнительные образцы из 40X подвергаются измерениям в соответствии со следующей процедурой:

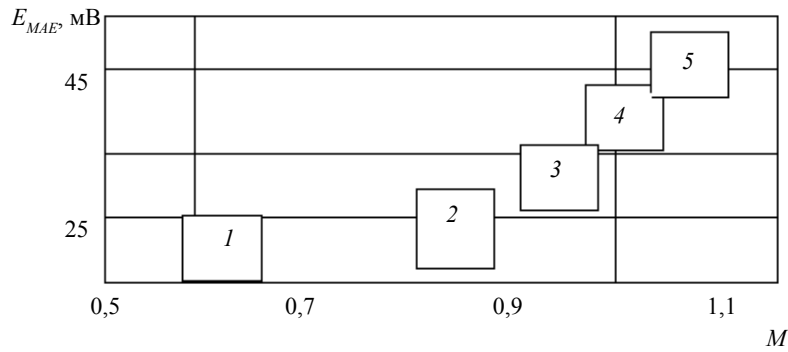


Рис. 4. Характеристичные области для двухпараметрического неразрушающего контроля чугуна. Информационные параметры — E_{MAE} и M .

сканирование $E_{BN}(I_B)$ выполняется при максимальном токе намагничивания, и оптимальный ток $I_{\text{опт}} = 75$ мА автоматически определяется по кривым на рис. 2а;

одновременно сканируется и второй неразрушающий информационный параметр, магнитоакустическое напряжение $E_{MAE}(I_B)$ по кривым на рис. 2б.

Рис. 2 показывает, что значение тока намагничивания $I_{\text{опт}} = 75$ мА является достаточным для одновременного измерения обоих информационных параметров с помощью устройства DK100, показанного на рис. 1. Оптимизированный параметр $I_{\text{опт}}$ сохраняется в устройстве и выполняет k измерений для каждого сравнительного образца. Полученные данные сохраняются в памяти прибора, и можно начинать формулировку критериев классификации.

На рис. 3 показаны характеристичные области групп стандартных образцов стали 40X, сформированные комплексным измерением параметров неразрушающей информации E_{BN} и E_{MAE} в соответствии с вышеуказанной процедурой. Перекрытие характеристичных областей является критерием неразличимости групп выборки. Аналогичные измерения были сделаны для сравнительных образцов чугуна в соответствии с процедурой, описанной выше. Результаты показаны на рис. 4 и 5.

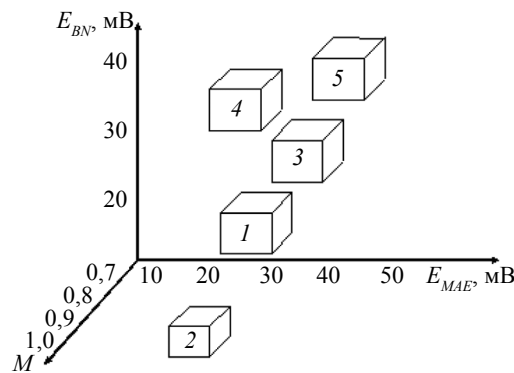


Рис. 5. Характеристичные области для трехпараметрического неразрушающего контроля чугуна. Информационные параметры — E_{BN} , E_{MAE} и M .

5.1. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 показано, что при использовании только информационного параметра E_{BN} однопараметрические доверительные интервалы групп 3 и 4 будут перекрываться и поэтому их трудно различить, а при использовании только информационного параметра E_{MAE} доверительные интервалы групп 2 и 3 перекрываются.

При комплексном использовании двух информационных параметров характеристичные области не перекрываются, (как на рис. 3), поэтому вероятность правильной классификации контролируемого материала по механическим свойствам увеличивается.

В зависимости от характеристичных областей, сформированных сравнительными образцами, проводится классификация реальных деталей или материалов в соответствии с методологи-

ей. Крестики указывают на средние значения измерений реальных образцов. Если мы выбрали группу 2 для сравнительных образцов твердости, то реальные образцы, отмеченные крестиками, которые находятся за пределами характеристичной области 2, не имеют необходимой жесткости.

Проведен сравнительный анализ результатов неразрушающего контроля групп образцов чугуна (см. табл. 1, справа). На рис. 4 показаны характеристичные области при комплексном использовании двух параметров неразрушающего контроля E_{BN} и M . Перекрывание характеристичных областей является показателем неразличимости групп, поэтому сферографические чугуны (группы 3, 4 и 5) трудно отличить по прочностным свойствам двухпараметрического неразрушающего контроля. На рис. 5 показаны характеристичные области для проведения трехпараметрического неразрушающего контроля. Анализ показывает, что при трехпараметрическом неразрушающем контроле достигается надежное разделение чугуна на группы с одинаковыми прочностными характеристиками.

6. ВЫВОДЫ

Разработанная автоматизированная система комплексного измерения информационных неразрушающих параметров: напряжения магнитного шума E_{BN} , напряжение магнитоакустической эмиссии E_{MAE} и скорости ультразвука C может быть использована для неразрушающего контроля термических и прочностных свойств образцов из конструкционной стали и литейного чугуна.

Представленные в данной работе алгоритмы позволяют разрабатывать программное обеспечение с использованием современных программных комплексов с открытым программным обеспечением — MatLab и LabView, что является необходимым условием для надежного комплексного неразрушающего контроля структуры и механических свойств машиностроительных материалов.

Работа была выполнена в рамках проекта М27/7 2018 года, финансируемого Исследовательским фондом МОН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Affi A., Azen S.* Statistical Analysis. A Computer oriented Approach. Academic Press, New York, 1982.
2. *Shibata M., Ono K.* Magnetomechanical acoustic emission — a new method for non-destructive stress measurement / Intern. Conf. of NDT, 15 May, 1981, London.
3. *Velev G., Georgiev G., Dimitrov D.* Method and device for measuring the structure of ultrasound materials / Patent RB N 85497.
4. *Velev G., Latkovski V.* A method of ultrasonic study of materials / E.J. «Technical acoustics» Sankt Peterburg, 3, 2003. <http://webcenter.ru/ejta/>
5. *Velev G., Latkovski V., Mitutsova L.* Non-destructive analysis of ferromagnetic materials by means of Barkhausen effect methods. ISBN 80-227-2076-3. Slovenska akademicka dubnica. 2004. P. 635—638.
6. *Gorkunov E., Subachev Yu., Povolotskaya A., Zadvorkin S. M.* The Influence of Elastic Deformations on the Hysteresis Properties of a Two-Layer Ferromagnet Composed of Components with Magnetostrictions of Opposite Signs // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 8. P. 469—480.
7. *Kostin V., Vasilenko O., Filatenkov D., Chekasina Yu., Serbin E.* Magnetic and magnetoacoustic testing parameters of the stressed—strained state of carbon steels that were subjected to a cold plastic deformation and annealing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 8. P. 624—632.
8. *Dzudzev B., Angelov V., Zlatkov M., Kostadinov P.* Testing of Automaticized System for complex non-destructive study of metallic materials // Scientific Journal «Machines, Tehnologies, Materials». 2019. Iss. 6. P. 273—276.
9. *Ivanova Y.* Non-destructive monitoring of tensile of mild steel samples by magnetic Barkhausen and ultrasonic methods / MATEC Web of Conferences 145, 05007, 2018, DOI: 10.1051 /mateconf /201814505007
10. *Ronggao C., Li Sh., Wang Z., Wang X.* A modified residual stress dependent Jile-Atherton hysteresis model // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. V. 465. P. 578—584.
11. *Gorkunov E., Povolotskaya A., Zadvorkin S., Putilova E., Mushnikov A., Bazulin E., Vopilkin A.* Some Features in the Behavior of Magnetic and Acoustic Characteristics of Hot-Rolled 08G2B Steel under Cyclic Loading // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. P. 827—836.
12. *Rabung M., Amiri M., Becker M., Kopp M., Tschuncky R., Veile I., Weber F., Weikert-Müller M., Szielasko Kl.* Nondestructive Characterization of Residual Stress Using Micromagnetic and Ultrasonic Techniques, IntechOpen, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90740

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ НА МАГНИТНЫЙ ОТКЛИК ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ AISI D2

© 2021 г. Ашвани Шарма¹, Абхиманью Чаудхари¹, Акаш Субхаш Авале¹,
Мохд Захир Хан Юсуфзай¹, Меганшу Вашиста^{1,*}

¹ Индийский технологический институт ИУБ,
Варанаси, Индия

*E-mail: mvashista.mec@iitbhu.ac.in

Поступила в редакцию 30.09.2020; после доработки 20.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

В настоящее время для достижения высокой производительности отраслям прецизионного производства требуются более быстрые инструменты контроля поверхности. В связи с этим метод шумов Баркгаузена (ШБ) принят в качестве быстрого метода контроля для качественной оценки целостности поверхности инструментальной стали AISI D2 при шлифовании. Исследуется влияние экологичного низкотемпературного хладагента на целостность поверхности шлифованного образца в режиме врезного шлифования при различной подаче и сравниваются сухие и влажные среды. Целостность поверхности оценивали по шероховатости, микроструктуре и микротвердости. Магнитный отклик шлифованной поверхности регистрировали ШБ-анализатором в виде среднеквадратичного отклонения (СКО), пика и количества импульсов. По результатам было установлено, что не было обнаружено значительных изменений в микроструктуре и микротвердости шлифованной поверхности и подповерхностей после криошлифования из-за более низкой термомеханической нагрузки. Кроме того, меньшая шероховатость поверхности была получена в случае криошлифования за счет эффекта термического размягчения. Может быть достигнута линейная корреляция между входными параметрами ШБ, т.е. напряженностью магнитного поля, и ШБ-откликов при различной частоте намагничивания. Наконец, в условиях криогенной среды были обнаружены более хорошие ШБ-отклики, включающие более высокое СКО, пик и количество импульсов.

Ключевые слова: магнитный шум Баркгаузена, микроструктура, микротвердость, шероховатость поверхности, низкотемпературное шлифование, инструментальная сталь AISI D2.

DOI: 10.31857/S0130308221030039

ВВЕДЕНИЕ

Шлифование обычно представляет собой процесс удаления материала в небольшом количестве с поверхности при производстве прецизионных компонентов, которое требует соблюдения высокой чистоты поверхности и жестких размерных допусков. Удаление материала происходит за счет совместного срезающего, рассекающего и истирающего действия неравномерно распределенных острых абразивных зерен. Кроме того, такое действие приводит к выделению большого количества тепла в месте шлифования. Сильный нагрев влияет на термомеханические характеристики заготовки и шлифовального круга, что снижает производительность шлифования. Чтобы решить эту проблему, необходима охлаждающая жидкость для отвода тепла из зоны шлифования и из режущей кромки абразивных зерен, которая не только удаляет микрочастицы металлической пыли, но и обеспечивает достаточную смазку. С другой стороны, при более высокой скорости шлифовального круга стандартного охлаждения недостаточно, чтобы добраться до зоны шлифования, которая находится на границе раздела между заготовкой и шлифовальным кругом [1]. Следовательно, смазочно-охлаждающей жидкости сложно попасть в зону шлифования, чтобы сдерживать температуру при большей подаче. В результате происходят тепловые потери в виде горения, появления микротрещин и физических и химических изменений на шлифованной и соседней поверхности [2], а при более высокой температуре смазочно-охлаждающая жидкость немедленно закипает и испаряется, что отрицательно сказывается на здоровье оператора и окружающей среде. Таким образом, экологически безопасный метод охлаждения и смазки, то есть криогенное охлаждение, играет решающую роль в производственном секторе, поскольку он экологически безопасен и позволяет эффективно контролировать температуру в зоне шлифования [3].

В отраслях прецизионного производства оценка качества готового компонента является очень важной задачей, поскольку целостность поверхности значительно влияет на срок службы. В настоящее время многие методы (такие как энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДРС), рентгеновская дифракция (РД) и оптическая микроскопия) используются в промышленности, а также в исследовательских организациях для определения показателей целостности поверхности (например, остаточные напряжения, микроструктура и качество поверхности шлифованных об-

разцов). Вероятно, это занимает много времени, дорого стоит и может проводиться только в лаборатории [4]. Следовательно, многие обрабатывающие отрасли находят уникальный инструмент, с помощью которого можно проверять образец во время производства в режиме онлайн.

Метод шумов Баркгаузена (ШБ) — это метод неразрушающего контроля. Его можно легко использовать для оценки целостности поверхности ферромагнитных материалов, таких как все типы стали. Метод ШБ обеспечивает определенные преимущества: глубокое проникновение, меньшее потребление энергии, более быстрое измерение и портативность оборудования [5]. ШБ-анализатор работает на вихретоковом эффекте. Как правило, ШБ-сигнал генерируется при необратимом смещении доменной границы во время намагничивания заготовки. Когда ферромагнитный материал намагничен, доменные границы стремятся выровняться в направлении приложенного магнитного поля. Это движение сдерживается дефектами решетки, такими как границы зерен или дислокации. Чтобы преодолеть эти препятствия, к зажатой стенке прикладывают повышенное магнитное поле. Ускоренные скачки доменной стенки по зажатым стенкам вызывают немедленные флуктуации магнитного потока, называемые шумом Баркгаузена (ШБ) [6]. Многие исследователи использовали метод ШБ для количественной оценки качества обработанной поверхности. Vashista и др. [7] использовали такие параметры ШБ, как СКО и пик для оценки ожога при шлифовании подшипниковой стали AISI 52100. Они показали влияние подачи и скорости подачи на параметры микроструктуры, микротвердости и остаточного напряжения. Аналогичным образом Cillikova и др. [8] оценили повреждение поверхности подшипниковой стали 100Cr6 (в форме кольца) при различных условиях шлифования. Они наблюдали линейную корреляцию между характеристиками магнитных сигналов ШБ и конечными результатами обработки поверхности, таких как микроструктура и остаточные напряжения. Недавно Srivastava и др. [9] отметили, что метод ШБ более надежен для качественной оценки качества поверхности после шлифования. При различных входных параметрах, таких как подача, скорость подачи в сухих и влажных средах, они исследовали термическое повреждение шлифованной поверхности по величине магнитного отклика.

После изучения литературы по теме был сделан вывод, что метод ШБ часто применяется для оценки качества обработки. Но в то же время отсутствуют систематические работы по анализу подлога при шлифовании инструментальных сталей. Настоящая работа посвящена оценке термического повреждения инструментальной стали AISI D2 при различных условиях шлифования. Эксперименты проводились с варьированием подачи и шлифовальных сред: сухая, влажная и криогенная, что приводит к разному уровню термповреждений шлифованного образца. Целостность поверхности шлифованных образцов оценивалась по микроструктуре, микротвердости и шероховатости поверхности. Наконец, с помощью метода ШБ было исследовано влияние термического повреждения на целостность поверхности шлифованного образца.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты по шлифованию проводили на неупрочненной инструментальной стали AISI D2 с использованием плоскошлифовального станка (производитель: HMT 455H, Индия) с кругом из белого оксида алюминия. Размер заготовки составляет $80 \times 15 \times 8$ мм. Для определения оптимального диапазона параметров процедуры шлифования было проведено множество пробных исследований. Значения твердости неупрочненной инструментальной стали AISI D2 составили 340 ± 20 HV. Элементный состав инструментальной стали AISI D2 и условия экспериментов приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Элементный состав инструментальной стали AISI D2, мас. %

| C | Cr | Ni | Si | Mn | Mo |
|------|------|------|------|------|-----|
| 1,42 | 11,3 | 0,20 | 0,45 | 0,37 | 1,1 |

На рис. 1 представлена экспериментальная установка для низкотемпературного шлифования. Эта установка состоит из двух основных частей: дьюара и азотного газового баллона. Дьюаром называют сосуд с жидким азотом (LN_2), который используется для хранения LN_2 . Газообразный азот используется для создания достаточного давления в дьюаре для переноса

Параметры шлифования

| Параметры | Свойства |
|--------------------------|----------------------------------|
| Шлифовальный круг | Оксид алюминия (AA60K5V6) |
| Размеры круга | 250×20×76,2 мм |
| Обрабатываемый материал | Инструментальная сталь AISI D2 |
| Скорость круга | 39,42 м/с |
| Скорость подачи | 10 м/мин |
| Подача | 6,24 мкм |
| Условия окружающей среды | Сухо, влажно, низкая температура |
| Дрессер | Алмазный карандаш |

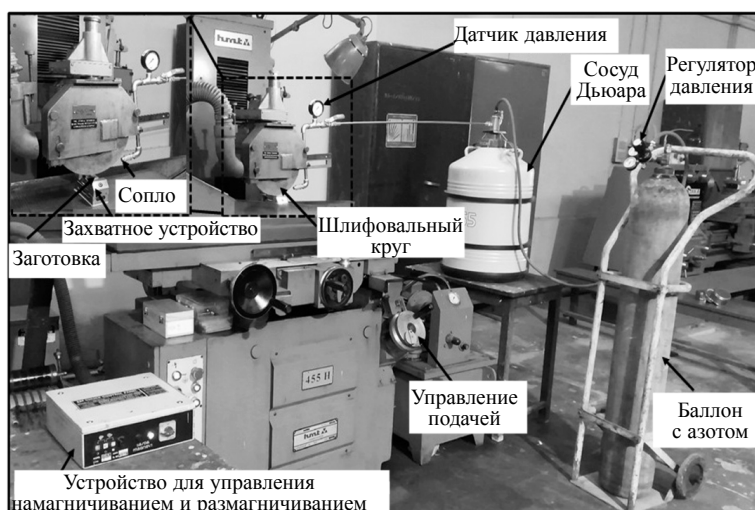


Рис. 1. Экспериментальная установка для низкотемпературного шлифования.

LN_2 из Дьюара в зону шлифования с точным диаметром сопла 3 мм. Сопло закреплено на расстоянии 50 мм от зоны шлифования с заданным углом сопла в 12° для эффективного охлаждения во время шлифования. Профилометр (производитель: Mitutoyo Surftest, SV-2100S4) использовался для измерения шероховатости шлифованной поверхности в трех различных точках вдоль направления скольжения с длиной отсечки 0,8 мм. Для металлографического анализа и анализа микротвердости каждый образец разрезали перпендикулярно направлению шлифования. Площадь поперечного сечения образцов была подвергнута горячей формовке в прессе с использованием частиц бакелита. Горячеформованные образцы шлифовали до зеркального блеска с помощью наждачной бумаги и алмазного полирования. Далее очищенный образец протравливали 5 % раствором нитала в течение примерно 15 с. Наконец, протравленный образец исследовали под оптическим микроскопом (производитель: Dewinter, Classical PL). Изменение твердости по поперечному сечению шлифованных образцов измеряли микротвердомером по Виккерсу с приложенной нагрузкой 100 г в течение 10 с (производитель: MicroMech Technologies). Вдавливание начиналось на расстоянии 30 мкм от края шлифованной поверхности и достигало 430 мкм от поверхности в пяти различных положениях. Наконец, ШБ-анализ был выполнен с использованием анализатора шумов Баркгаузена (производитель: Technofour Magstar), как показано на рис. 2. Это устройство состоит из датчика с плоской поверхностью с измерительной катушкой в центре, которая создает магнитное поле в шлифованном образце и принимает ШБ-сигнал. В табл. 3 представлены ШБ-параметры, используемые в магнитном анализе.

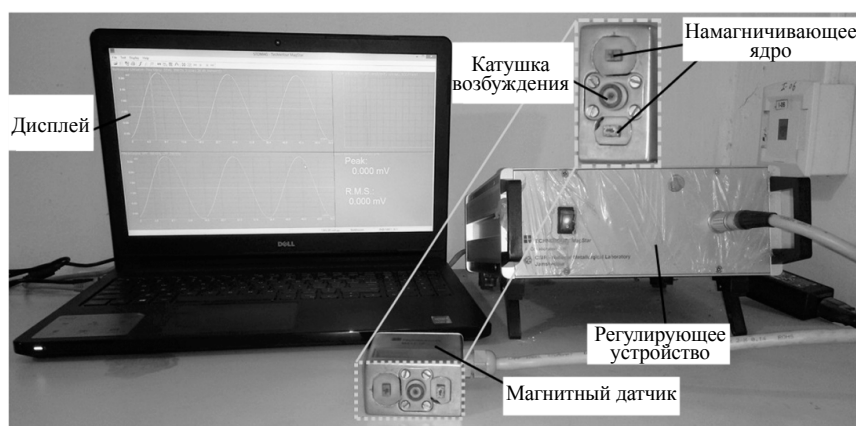


Рис. 2. Анализатор шумов Баркгаузена.

Таблица 3

Входные параметры для определения параметров шлифованной инструментальной стали AISI D2

| ШБ-параметры | Величина |
|-------------------------------|----------------------|
| Количество циклов | 3 |
| Усиление | 20 дБ |
| Полоса частот | 10—300 кГц |
| Частота перенамагничивания | 25, 40 Гц |
| Напряженность магнитного поля | 200, 400, 600, 800 Э |

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктурный анализ

При шлифовании обрабатываемый материал подвергается большим термическим, механическим и химическим воздействиям, что вызывает эффект деформационного упрочнения и рекристаллизацию шлифованной поверхности. На рис. 3 представлены микроструктурные изображения различных шлифованных образцов и основного металла в плоскости, перпендикулярной обрабатываемой поверхности. Как показано на рис. 3а, типичная микроструктура инструментальной стали AISI D2 демонстрирует равномерно распределенные карбиды сплава с высоким содержанием хрома в матрице перлита. Этот богатый хромом карбид делает ее одной из самых твердых сталей. При более высокой глубине подачи (24 мкм) наблюдалось небольшое удлинение зерен возле шлифованной поверхности в каждой среде шлифования. Причина в большем контакте режущих кромок с заготовкой из-за увеличения подачи. Это приводило к большему трению в круге и на поверхности детали, а в зоне шлифования выделялось сильное тепло. Следовательно, могут наблюдаться большие тепловые повреждения с точки зрения удлинения зерен или фазового превращения вблизи зоны шлифования. Из рис. 3б видно, что максимальная пластическая деформация на глубине около 22 мкм от поверхности наблюдалась при сухом шлифовании. Это ожидаемо, потому что в зоне шлифования выделяется огромное количество тепла в результате срезающего, рассекающего и истирающего действия в отсутствие охлаждающей жидкости. Xavier и др. [10] также указали, что сухая обработка приводит к серьезным фазовым превращениям, как следует за мокрой и криогенной обработкой стали AISI 52100. При мокром шлифовании на обработанной поверхности наблюдался небольшой слой термических повреждений (примерно 9 мкм) из-за эффективной смазки и охлаждения. С другой стороны, никаких изменений поверхности, таких как пластическая деформация или удлинение зерен, на шлифованной поверхности обнаружено не было из-за минимальной термомеханической нагрузки во время низкотемпературного шлифования. Это происходит из-за того, что LN_2 резко снижает температуру деформации, перемещение зерен становится осложненным. В результате термически поврежденная область становится очень

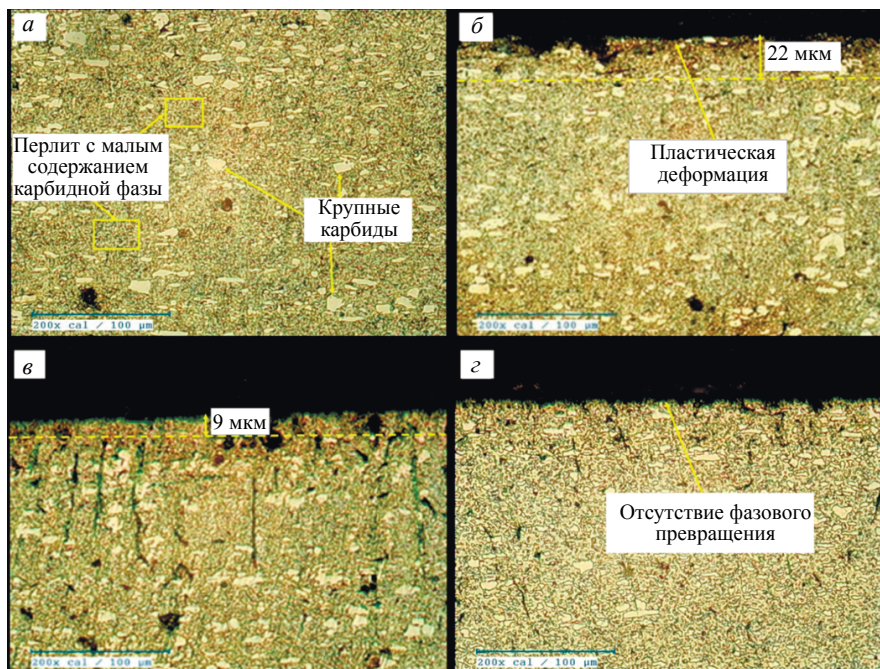


Рис. 3. Микрофотографии шлифованных образцов в поперечном сечении в различных средах: исходный металл (а); сухая (б); влажная (в); низкотемпературная (з).

маленькой или незначительной. Аналогичным образом Клокке и др. в [11] сообщают, что низкотемпературная обработка сводит к минимуму глубину термического повреждения обработанной поверхности и подповерхности по сравнению с традиционной мокрой обработкой гамма-алюминидов титана.

Измерение микротвердости

На рис. 4 показано изменение микротвердости в зависимости от расстояния от шлифованной поверхности при использовании шлифовального круга из оксида алюминия при сухом, влажном и криогенном шлифовании. При шлифовании обрабатываемый материал подвергается воздействию абразивных зерен. Следовательно, поверхность шлифования испытывает пластическую деформацию и термические повреждения по направлению сдвига. В результате твердость шлифованной

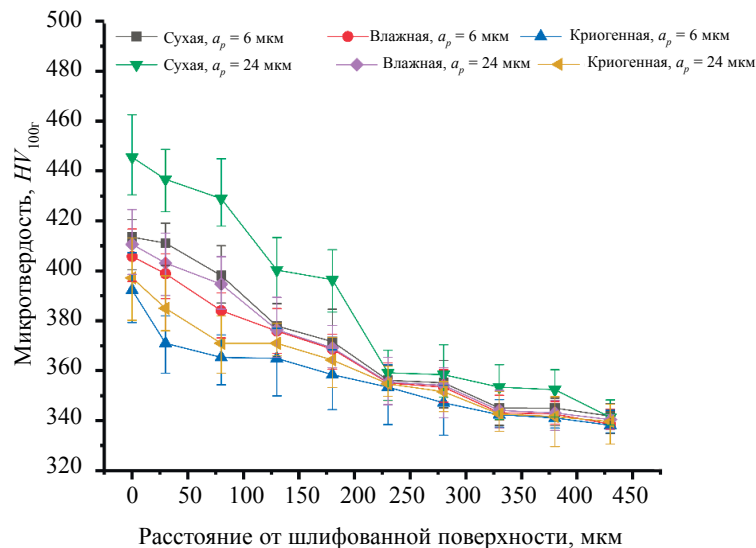


Рис. 4. Профиль микротвердости в зависимости от расстояния от шлифованной поверхности.

поверхности становится намного выше, чем у основного металла. Кроме того, значение твердости экспоненциально уменьшалось с увеличением глубины до твердости основного металла. Цель заключается в минимизации эффекта деформационного упрочнения в глубине материала. Awale и др. [12] также сообщили, что профиль твердости экспоненциально уменьшается по мере увеличения глубины от поверхности шлифования из-за уменьшения эффекта термического разупрочнения. На рис. 4 также показано, что максимальная твердость наблюдалась при сухом шлифовании по сравнению с мокрым и криогенным. В основном это происходит из-за проникновения большого количества тепла в обрабатываемую поверхность, которая вызывает большее измельчение зерна в области пластической деформации. Мелкое зерно — это повышенная прочность пластически деформированного слоя. В результате была получена более высокая твердость на поверхности и под поверхностью шлифованного образца. Meyers и Chawla [13] объяснили фундаментальную связь размера зерна и твердости с помощью эффекта Холла — Петча. Кроме того, небольшое изменение твердости наблюдалось при мокром шлифовании с последующим сухим шлифованием. Это может быть связано с наличием прочной антифрикционной смазывающей трибопленки, которая обеспечивала эффективную смазку на границе раздела диска и материала. Это уменьшало проникновение тепла в обрабатываемую поверхность при меньшей подаче в течение короткого времени шлифования. С другой стороны, после мокрого шлифования было получено сильное изменение величины твердости. Возможной причиной является недостаточная охлаждающая способность жидкости при большей подаче (24 мкм). Что касается криогенного шлифования, очевидно, что вдоль поверхности обнаружено незначительное изменение твердости. Как правило, LN_2 обладает исключительной способностью к теплопередаче из обрабатываемой зоны из-за его сверхнизкой температуры кипения ($-196\text{ }^\circ\text{C}$) [3]. В настоящей работе охлаждающая жидкость LN_2 снижала температуру в зоне шлифования, что уменьшало термическое размягчение как шлифованной поверхности, так и подповерхностной области. Из-за наименьшего механического размягчения твердость при криогенном шлифовании становится ниже. Каунак и др. [14] пришли к выводу, что криогенная обработка сводила к минимуму эффект термического разупрочнения обработанного образца.

Шероховатость поверхности

При обработке шероховатость поверхности является одним из важных критериев выбора шлифованных компонентов, от которых зависит размерный допуск и качество поверхности готового образца. Микрогеометрические характеристики обработанной поверхности описывались средним арифметическим значением шероховатости поверхности (R_a). Профиль шероховатости сформировался при шлифовании за счет взаимодействия твердых абразивных частиц с обрабатываемым материалом. На рис. 5 показано значительное изменение шероховатости поверхности при большой и малой подаче в различных условиях шлифования. Это также указывает на то, что шероховатость поверхности увеличивается с увеличением подачи. При большей величине подачи

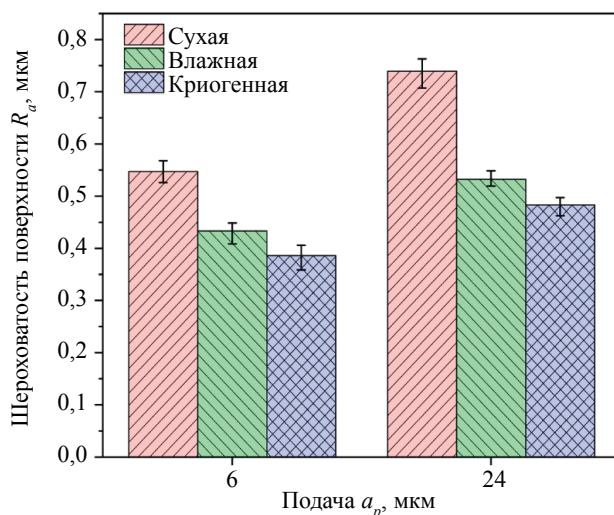


Рис. 5. Изменение шероховатости поверхности при различных условиях.

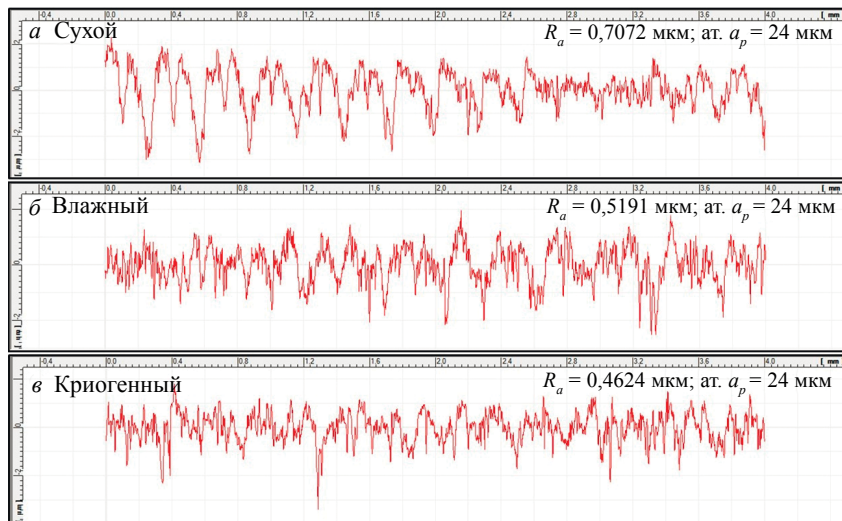


Рис. 6. 2D-профили шероховатости шлифованной поверхности в различных условиях.

(24 мкм) значение R_a при каждом условии шлифования было больше по сравнению с более малым значением подачи (6 мкм). Это происходит благодаря размягчению обрабатываемого материала из-за высокой температуры шлифования при более высокой глубине подачи, что приводило к перемещению материала, находящегося в контакте с зерном. Мелкие частицы прилипали к промежуткам между абразивными зёрнами шлифовального круга. Далее эти частицы осаждались на поверхности благодаря последовательным проходам шлифовального круга [15]. Следовательно, при большей глубине подачи были получены низкое качество поверхности и более высокая шероховатость поверхности. Аналогичным образом, как показано на рис. 5, большая R_a была получена при сухом шлифовании из-за плохих условий шлифования, которые включают высокую температуру в зоне обработки и резко растущее количество затертых зёрен круга. При введении охлаждающая жидкости наблюдается меньший износ зерна, вызванный лучшей смазкой. В результате было достигнуто улучшение качества поверхности (снижение R_a на 20—28 %). При использовании криошлифования была получена более низкая шероховатость поверхности, и уменьшение составило примерно 29—35 % по сравнению с сухим шлифованием. Это происходило главным образом из-за лучшего сохранения остроты абразивных зёрен под охлаждающей жидкостью LN_2 , и, следовательно, обрабатываемый материал успешнее удалялся срезанием и частично рассеением, что привело к меньшей шероховатости поверхности [15].

2D-профили шероховатости шлифованной поверхности были исследованы для всех сред шлифования: сухой, влажной и низкотемпературной. Результаты представлены на рисунках ба—в. Из-за повышенной температуры в сухих средах на рис. ба виден неровный вид пиков и впадин в области измерения. Вертикальное отклонение (пики и впадины) наблюдалось в области больших и меньших от средней линии значений. Также наблюдалась максимальная разница между самым максимальным и самым минимальным значением. Yuvaraj и Kumar [16] также сообщают о глубоких царапинах или следах на обработанной поверхности после абразивной обработки. Точно так же на рис. бб виден неровный профиль шероховатости с меньшими гребнями во влажной среде из-за меньшей температуры. Следовательно, эти 2D-профили указывали на меньшую величину шероховатости R_a в сухой среде. Небольшое отклонение от средней горизонтальной линии указывает на меньшую высоту пиков и впадин, как показано на рис. бв. Из-за низкой температуры самые низкие значения шероховатости и острые края были обнаружены в случае криошлифования.

Анализ шумов Баркгаузена

Неразрушающие методы, такие как ШБ-анализ, могут быть применены в поточном производственном цехе для быстрой оценки целостности поверхности. Отклик метода зависит от физического состояния шлифованного образца, например, от переменной твердости, пластической деформации и шероховатости поверхности [17]. ШБ-отклики были получены в виде СКО

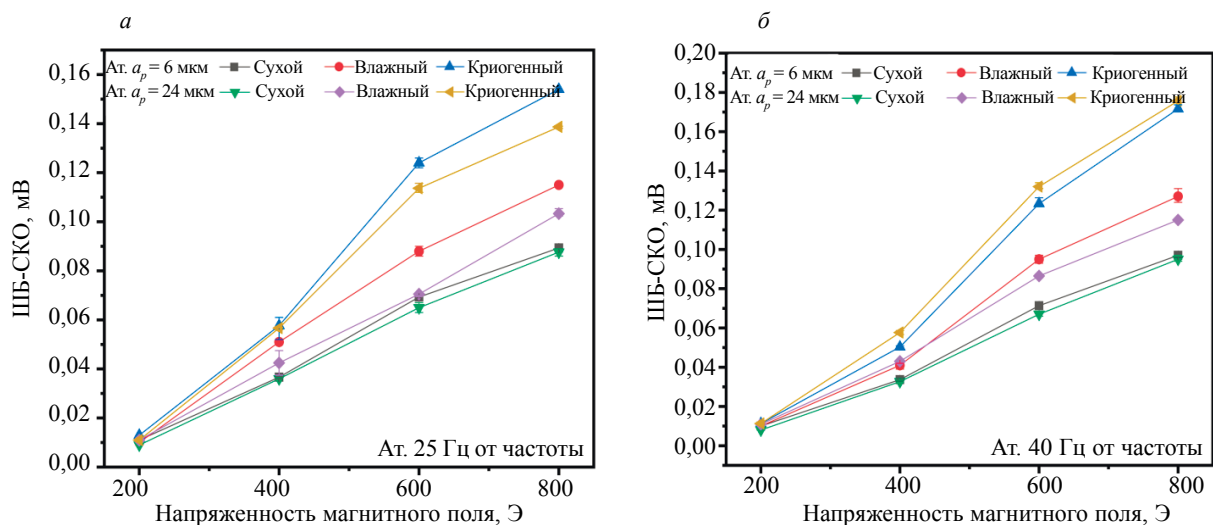


Рис. 7. ШБ-СКО для разных условий шлифования при различных частотах перемагничивания: 25 Гц (а); 40 Гц (б).

(ШБ-СКО), пика и количества импульсов. ШБ-анализатор записал пять значений для каждого шлифованного образца. На рис. 7а, б показано изменение ШБ-СКО в зависимости от напряженности магнитного поля при различных подачах и условиях окружающей среды. ШБ-СКО показывает тенденцию к увеличению с увеличением напряженности магнитного поля. ШБ-СКО варьировалось в пределах 0,009—0,154 и 0,008—0,176 мВ при различной частоте намагничивания 25 и 40 Гц соответственно. Более высокое ШБ-СКО (0,176 мВ) было получено при величине подачи 24 мкм и частоте намагничивания 40 Гц при криошлифовании.

На рис. 8 показано влияние различной частоты намагничивания напряженности магнитного поля на пик ШБ при сухом, влажном и криогенном шлифовании. Было обнаружено, что пик ШБ увеличивается с увеличением напряженности магнитного поля. Пиковое значение ШБ наблюдалось в пределах 0,066—1,435 и 0,0587—1,685 мВ при частоте намагничивания 25 и 40 Гц соответственно. При подаче 24 мкм и частоте намагничивания 40 Гц максимальный пик ШБ (1,685 мВ) был получен при криогенном шлифовании. Пик ШБ при влажном и сухом шлифовании при глубине подачи 24 мкм составлял 1,045 и 0,771 мВ соответственно, что на 36,49 и 54,24 % ниже, чем при криогенном шлифовании.

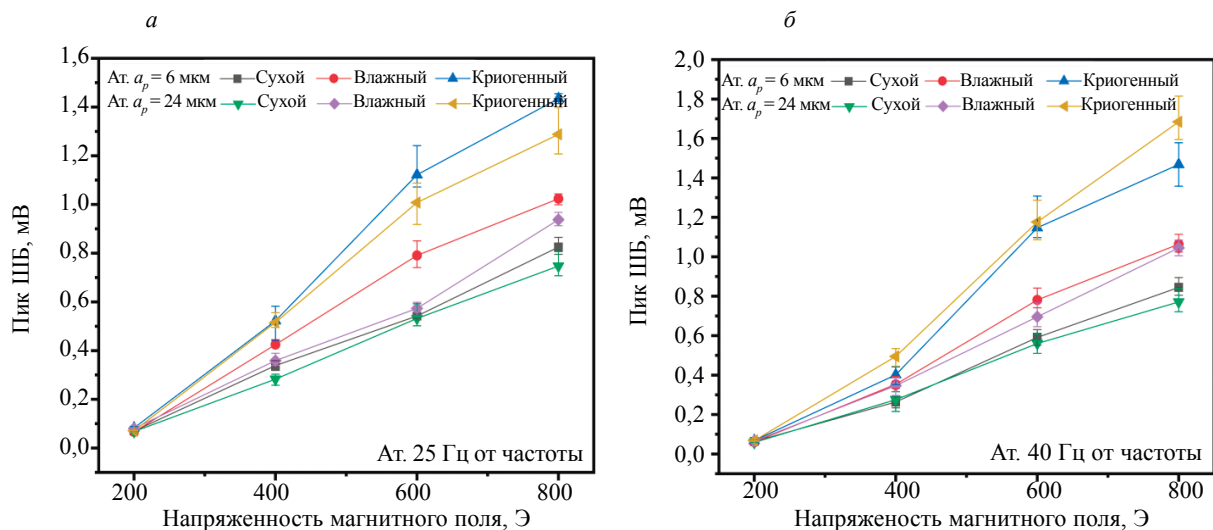


Рис. 8. Зависимость пикового значения ШБ от напряженности магнитного поля в различных средах при частотах: 25 Гц (а); 40 Гц (б).

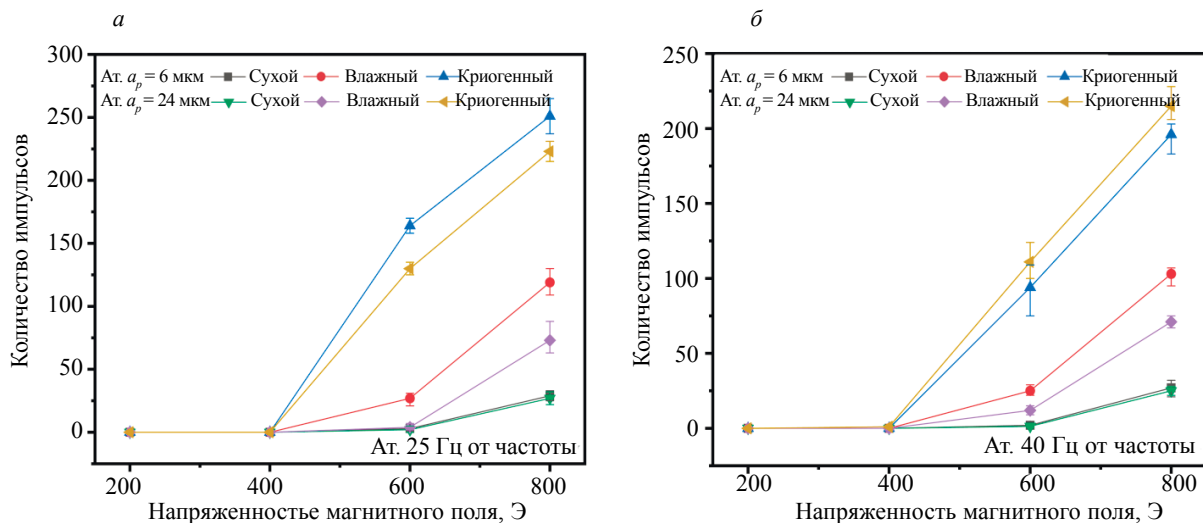


Рис. 9. Изменение числа импульсов от напряженности магнитного поля в различных средах при частотах: 25 Гц (а); 40 Гц (б).

Рис. 9 показывает зависимость частоты намагничивания от количества импульсов с различной напряженностью магнитного поля. Количество импульсов можно варьировать в диапазоне 0—251 и 0—215 при частоте намагничивания 25 и 40 Гц соответственно. Было отмечено, что диапазон количества импульсов уменьшается с увеличением частоты намагничивания, которая была на 14,34 % ниже частоты намагничивания 25 Гц.

Из рис. 7—9 можно заметить, что график сигналов ШБ изменяется с напряженностью приложенного магнитного поля. Эффективность анализа ШБ зависит от таких параметров, как частота намагничивания и напряженность магнитного поля. Когда к готовому образцу прикладывалась напряженность магнитного поля, частота намагничивания этого поля влияет на глубину проникновения в обрабатываемый материал. Частота намагничивания увеличивается, затем уменьшается глубина проникновения магнитного поля, что означает малое проникновение [19]. Другими словами, при более высокой частоте магнитное поле плохо проникает в подповерхностную область. Это приводит к слабому движению доменных стенок, а значит, и к слабому магнитному отклику, что влияет на общую генерацию импульсов. Следовательно, слабый отклик ШБ с точки зрения полученных более низких значений СКО и максимумов. С другой стороны, энергия намагничивания обеспечивается внешним магнитным полем для движения магнитных доменных стенок. Больше магнитной энергии образовывается с увеличением напряженности магнитного поля. Увеличение напряженности магнитного поля обеспечивает большее ускорение движения и вращения магнитных доменных границ. Для движения доменных стенок препятствиями выступают термические повреждения или пластически деформированные границы зерен. Доменные стенки создают импульс напряжения при пересечении любого препятствия. Это означает, что движение доменных стенок существенно повлияло на количество импульсов. Vashista и Paul [19] предложили новый ШБ-подход для оценки прижога шлифуемой поверхности подшипниковой стали при сухом и влажном шлифовании. Они обнаружили, что в пережженном шлифованном образце имеет место линейная зависимость между остаточным напряжением и количеством отсчетов и событий. Число импульсов магнитного поля варьировалось от 200 до 800 Э. Можно заметить, что ШБ-отклики, т.е. СКО и пиковое значение, немного различались в пределах от 200 до 400 Э напряженности магнитного поля. Это было связано с нулевым числом импульсов, возникающих в этом диапазоне величины напряженности магнитного поля. Причина в том, что при меньшей напряженности магнитного поля образуется недостаточная магнитная энергия. Далее, при увеличении напряженности магнитного поля до 800 Э наблюдалось резкое изменение среднеквадратичного и пикового значений из-за быстрого перемещения доменной стенки через препятствия. Из рис. 7—9 также было замечено, что для перемещения доменных стенок через препятствия необходимо минимальное магнитное поле.

На рис. 7—9 показано значительное изменение ШБ-сигнала при сухом, влажном и криогенном измельчении. Для лучшего понимания ШБ-отклики коррелируют с такими показателями целостности поверхности, как фазовое превращение и изменение микротвердости шлифованных образцов. Многие авторы сообщают, что на сигнал ШБ влияет количество перемещений доменной

стенки под влиянием внешнего магнитного поля. Согласно Jiles [20], размер зерна существенно влияет на ШБ-отклик. Если размер зерна становится меньше, количество доменных стенок увеличивается, что уменьшает амплитуду ШБ. Вторым параметром, влияющим на ШБ-сигнал, была твердость обрабатываемого материала. Santa-Aho и др. [21] сообщают, что увеличение твердости материала приводит к увеличению плотности дислокаций, что ограничивает движение доменных стенок и приводит к малому ШБ-отклику. При криогенном шлифовании не наблюдалась пластическая деформация (измельчения зерна отсутствовало), а также была получена немного более высокая твердость на поверхности по сравнению с основным металлом (см. рис. 3 и 4), т.е. происходило незначительное изменение границ зерен на поверхности земли и под поверхностью. Таким образом, в случае криогенного шлифования были получены более хорошие характеристики ШБ с точки зрения более высоких значений СКО, пиков и количества импульсов. Кроме того, при сухом шлифовании наблюдались более высокая твердость и сильная пластическая деформация из-за большого проникновения тепла в обрабатываемый образец. Термически поврежденные зерна создавали препятствия для движения доменной стенки. Это привело к плохому ШБ-отклику, включая более низкие значения СКО, пиков и количества импульсов, как показано на рис. 7—9. При влажном шлифовании были получены лучшие результаты по сравнению с сухим шлифованием из-за эффективной смазки, а охлаждающая среда частично контролировала проникновение тепла в обрабатываемый материал. Рис. 7—9 также показывают взаимосвязь между шероховатостью поверхности и ШБ-параметрами. На основе построенного графика было обнаружено, что величина СКО, пики и количество импульсов в различных условиях окружающей среды увеличивается с уменьшением значения R_a . По данным Deng и др. [22], ШБ-отклики увеличиваются с уменьшением шероховатости поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по данному исследованию.

- (1) Не было обнаружено значительного изменения микроструктуры при криогенном измельчении из-за более высокой передачи тепла из зоны шлифования охлаждающей жидкостью LN₂.
- (2) Более высокая микротвердость была получена в случае сухого шлифования при глубине подачи 24 мкм, и ее влияние на внутреннее состояние заготовки постепенно снижается до 430 мкм.
- (3) Шероховатость поверхности при криогенном шлифовании оказалась ниже, чем при сухом и влажном шлифовании благодаря наличию смазки между диском и материалом заготовки.
- (4) Согласно анализу ШБ, частота намагничивания и напряженность магнитного поля существенно влияют на глубину проникновения магнитного поля в образец. Более низкие значения магнитного поля и частоты необходимы для лучшего магнитного отклика инструментальной стали AISI D2.
- (5) Хороший ШБ-отклик с точки зрения более высоких значений СКО, пиков и количества импульсов был обнаружен при криогенном шлифовании.

Особая благодарность ИТИ УИБ за финансовую поддержку в рамках гранта (No. ИТ(ВНУ)/Dec/2013-14/5110/L) и Проекту Институтских исследований ((ИТ(ВНУ)/R & D)/IRP/2015-16/2832).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malkin S.* Grinding technology: theory and applications of machining with Abrasives. Ellis Horwood Limited, Chichester, England. 1989.
2. *Yin G., Gong Y., Li Y., Cheng J.* Research on force and temperature characteristics of novel point grinding wheels // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. V. 32. P. 3817—3834.
3. *Hong S.Y.* Economical and ecological cryogenic machining // *J. Manuf. Sci. Eng.* 2001. V. 123. P. 331—338.
4. *Lasaosa A., Gurruchaga K., Arizti F., Martinez-De-Guerenu A.* Induction hardened layer characterization and grinding burn detection by magnetic Barkhausen noise analysis // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2017. V. 36. P. 27.
5. *Ivanova Y., Partalin T.* Comparative measurements of the stress state in a rolled carbon steel using magnetic Barkhausen noise and ultrasonic method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012. V. 48. P. 137—146.
6. *Filinov V.V., Arakelov P.G., Kunin N.T., Golovchenko D.A.* To the Question about the Thickness of Informative Layer in Magnetic-Noise Testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. P. 31—38.
7. *Vashista M., Gaddam A., Paul S.* Study of surface integrity of ground bearing steel using Barkhausen noise technique // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012. V. 63. P. 771—783.

8. Čilliková M., Mičieta B., Neslušán M., Blažek D. Nondestructive magnetic monitoring of grinding damage // *Procedia Materials Science*. 2016. V. 12. P. 54—59.
9. Srivastava A., Awale A., Vashista M., Yusufzai M.Z.K. Monitoring of thermal damages upon grinding of hard-ened steel using Barkhausen noise analysis // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020. V. 34. P. 2145—2151.
10. Dutra Xavier S.E., Delijaicov S., De Farias A., Filho M.S., Batalha G.F. Investigation on the surface integrity and tool wear in cryogenic machining / In: *AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics*. 2011. P. 1199—1204.
11. Klocke F., Settineri L., Lung D., Priarone P.C., Arft M. High performance cutting of gamma titanium aluminides: Influence of lubricoolant strategy on tool wear and surface integrity // *Wear*. 2013. V. 302. P. 1136—1144.
12. Awale A., Srivastava A., Vashista M., Yusufzai M.K. Influence of minimum quantity lubrication on surface integrity of ground hardened H13 hot die steel // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. V. 100. P. 983—997.
13. Meyers M.A., Chawla K.K. *Mechanical behavior of materials*. Cambridge university press, 2008.
14. Kaynak Y., Lu T., Jawahir I. Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining // *Mach. Sci. Technol.* 2014. V. 18. P. 149—198.
15. Paul S., Chattopadhyay A. A study of effects of cryo-cooling in grinding // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1995. V. 35. P. 109—117.
16. Yuvaraj N., Kumar M.P. Surface integrity studies on abrasive water jet cutting of AISI D2 steel // *Mater. Manuf. Processes*. 2017. V. 32. P. 162—170.
17. Singh S., Awale A., Chaudhari A., Nahak B. Monitoring the microstructural changes of heat treated medium carbon steel by Barkhausen noise and hysteresis loop techniques // *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 26. P. 1198—1202.
18. Gupta S.K., Raja A.R., Vashista M., Yusufzai M.Z.K. Hysteresis loop analysis of gas metal arc welded ferritic stainless steel plate // *Materials Research Express*. 2019. V. 6. P. 096110.
19. Vashista M., Paul S. Novel processing of Barkhausen noise signal for assessment of residual stress in surface ground components exhibiting poor magnetic response // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2011. V. 323. P. 2579—2584.
20. Jiles D.C. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect // *Czechoslovak journal of physics*. 2000. V. 50. P. 893—924.
21. Santa-Aho S., Vippola M., Sorsa A., Latokartano J., Lindgren M., Leiviskä K., Lepistö T. Development of Barkhausen noise calibration blocks for reliable grinding burn detection // *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. V. 212. P. 408—416.
22. Deng Y., Li Z., Chen J., Qi X. The effects of the structure characteristics on Magnetic Barkhausen noise in commercial steels // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. V. 451. P. 276—282.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ С ФУНКЦИЕЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ

© 2021 г. С.П. Осипов^{1,*}, И.Г. Ядренкин², С.В. Чахлов^{1,**}, О.С. Осипов³,
Е.Ю. Усачёв⁴, А.А. Манушкин⁴

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия 634003 Томск, пл. Соляная, 2

³Medialooks, Россия, 236016, г. Калининград, ул. Александра Невского, 59

⁴МИРЭА — Российский технологический университет, Россия 119454 Москва,
пр-т Вернадского, 78

E-mail: *osip1809@rambler.ru; **chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 01.11.2020; после доработки 02.12.2020

Принята к публикации 11.12.2020

Предложена вычислительная модель рентгеновской компьютерной томографии с функцией оценки плотности в геометрии параллельного пучка. Модель включает в себя блоки имитации и корректировки синопграмм и реконструкции изображений сечений. При формировании синопграмм учитываются параметры объекта контроля, источника и регистратора рентгеновского излучения. Алгоритмы моделирования реализованы в системе MathCad и апробированы на виртуальных тестовых объектах.

Ключевые слова: источники рентгеновского излучения, регистраторы рентгеновского излучения, максимальная энергия рентгеновского излучения, рентгеновская компьютерная томография, плотность, эффективный атомный номер.

DOI: 10.31857/S0130308221030040

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается устойчивое повышение интереса к рентгеновской компьютерной томографии (КТ) как к средству исследования структуры различных объектов контроля (ОК) с размерами по стали от долей до сотен миллиметров [1—4]. Перспективы развития КТ в настоящее время связаны с измерениями линейных размеров, площадей, объемов, плотности, пористости и т.п. [5—8]. Задачи проектирования систем КТ определяются потребительскими интересами [9—11]. Совокупность соответствующей информации делится на две группы. В первую группу входят параметры, связанные с ОК: форма; внутренняя структура, материалы фрагментов. Вторую группу составляют ожидания потребителей относительно качества контроля методом КТ: контрастная чувствительность; пространственное разрешение; точность оценки измеряемого параметра; качество воспроизведения внутренней структуры по фантомам; производительность. Конструктивно системы КТ [12] состоят из источника рентгеновского излучения (ИРИ), регистратора рентгеновского излучения (РРИ), механической системы (МС) и алгоритма реконструкции (АР). Решение задачи проектирования сводится к рациональной оценке требуемых параметров ИРИ, РРИ, МС, АР, выбору характеристик схемы сканирования и последующему подбору конструктивных элементов системы КТ из приборов и комплектующих, имеющихся на рынке научного оборудования.

Составляющие систем КТ являются весьма дорогостоящими, поэтому для оценки возможности решения задач проектирования КТ для конкретных ОК эффективно применение вычислительных экспериментов [13—16]. Наиболее простой схемой сканирования в КТ является геометрия узкого параллельного пучка [12]. Для этой схемы минимален артефакт рассеяния [12, 17]. Вычислительная модель системы КТ состоит из формирования совокупности проекций (синопграмм) и реконструкции изображений. Алгоритм обратной проекции с фильтрацией (ОПФ) [12, 18, 19] продолжает оставаться одним из востребованных АР изображений КТ, поэтому при разработке вычислительной модели системы КТ с функцией оценки плотности будем использовать алгоритм ОПФ.

Вычислительные модели КТ и реализующие их программы [20] помимо решения задач проектирования необходимы для использования в процессах обучения студентов и аспирантов. Следует отметить, что с учетом вышесказанного для реализации вычислительных моделей КТ идеально подходит система MathCad [21], так как ее внутренний язык максимально соответствует естественному математическому языку.

1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИНОГРАММ

1.1. Обобщенное описание слоя объекта

Введем неподвижную систему координат XOY . Пусть $S \subset \mathbb{R}^2$ — множество точек слоя ОК. Слой ОК определен полностью, если в любой точке с координатами $(x, y) \in S$ известны значения плотности $\rho(x, y)$ и эффективного атомного номера (ЭАН) $Z(x, y)$.

1.2. Геометрическая схема формирования проекций

На рис. 1 приведена геометрическая схема формирования проекций в рентгеновской КТ. Центр неподвижной системы координат XOY совпадает с центром вращения ОК. Дополнительная система координат $X'OY'$ относится к ОК. Координаты точки в системах координат $X'OY'$ и XOY связаны друг с другом преобразованием поворота на угол θ :

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad \begin{cases} x = x' \cos \theta - y' \sin \theta \\ y = x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

Проекцией в КТ $P(x', \theta)$ называется распределение по x' интеграла от информативного параметра ОК p по соответствующему x' лучу — $L(x', \theta)$. Здесь x' изменяется в диапазоне от $-A$ до A , $|A| > R$, для любой точки $(x, y) \in S$ выполняется следующее условие: $x^2 + y^2 \leq R^2$. Запишем определение проекции в виде формулы:

$$P(x', \theta) = \int_{L(x', \theta)} p(y') dy'. \quad (2)$$

В качестве информативного параметра p , характеризующего материал, в КТ используются [22, 23]: линейный коэффициент ослабления излучения (ЛКО) μ , число Хаунсфилда, плотность ρ ; ЭАН Z . Наиболее полно материал ОК характеризуют ρ и Z .

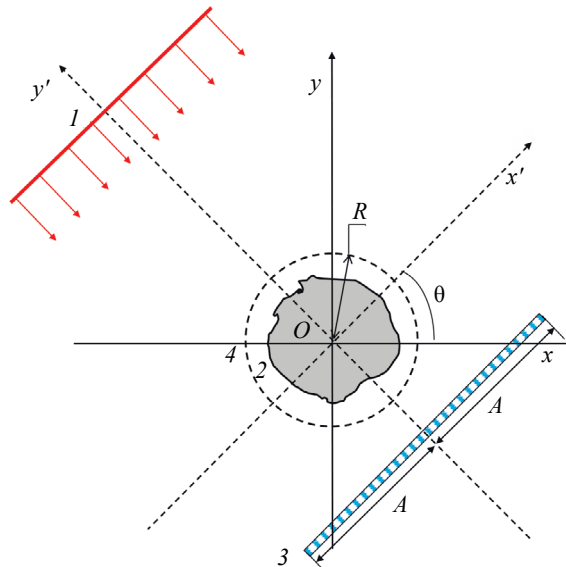


Рис. 1. Схема формирования проекций в рентгеновской КТ:
1 — ИРИ; 2 — ОК; 3 — линейный РРИ; 4 — окружность, описывающая сечение ОК.

1.3. Обобщенная модель формирования проекций в рентгеновской КТ

В качестве основы модели формирования проекций в КТ могут быть использованы модели формирования цифровых радиографических изображений [24—26]. Выражение связи цифровых сигналов (ЦС) с детекторов $J_d(x', \theta)$ с оценкой проекции $P^*(x', \theta)$ имеет вид:

$$P^*(x', \theta) = -\ln \frac{J_d(x', \theta) - B_d(x', \theta)}{W_d(x', \theta) - B_d(x', \theta)}, \quad (3)$$

здесь $B_d(x', \theta)$ — ЦС с детектора с выключенным ИРИ (темновые сигналы); $W_d(x', \theta)$ — ЦС с детектора без объекта контроля.

Для ИРИ с энергетическим спектром $f(E, E_{\max})$, где E_{\max} — максимальная энергия излучения, радиационно-чувствительного элемента (РЧЭ) толщиной h_s и интегрального режима регистрации аналоговые сигналы (АС) $J(E_{\max}, x', \theta)$, которые соответствуют ЦС $J_D(E_{\max}, x', \theta)$, оцениваются с помощью формулы, которая аналогична выражению из [25]:

$$\begin{aligned} J(E_{\max}, x', \theta) &= I(E_{\max}, x', \theta) + B(x') = \\ &= C_E(x') N_0(E_{\max}, x') \int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \exp(-P_E(E, x', \theta)) \varepsilon(E, h_s) dE + B(x'), \end{aligned} \quad (4)$$

где $C_E(x')$ — коэффициент преобразования поглощенной энергии излучения в АС; $N_0(E_{\max}, x')$ — число фотонов, попадающих на фронтальную поверхность РЧЭ без ОК за время формирования проекции; $E_{ab}(E, h_s)$ — среднее значение энергии, переданной РЧЭ зарегистрированным фотоном с энергией E ; $\varepsilon(E, h_s)$ — эффективность регистрации. В формуле (4) $P_E(E, x', \theta)$, $-A \leq x' \leq A$, представляет собой проекцию для фотонов с энергией E , когда информативным параметром p является ЛКО излучения. Для РЧЭ с малыми размерами необходимо учитывать утечку и перенос энергии вовне и в соседние элементы.

Выражение для вычисления $P_E(E, x', \theta)$ имеет вид:

$$P_E(E, x', \theta) = \int_{L(x', \theta)} \mu(E, y') dy' = \int_{L(x', \theta)} m(E, Z(y')) \rho(y') dy', \quad (5)$$

где $m(E, Z)$ — массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения с энергией E материалом с атомным номером Z . Отметим, что $J(E_{\max}, x', \theta)$ для $P_E(E, x', \theta) = \infty$ совпадает с $B(x')$, а для $P_E(E, x', \theta) = 0$ — с $W(x')$.

Аналоговые сигналы $J(E_{\max}, x', \theta)$ трансформируются в ЦС:

$$J_D(E_{\max}, x', \theta) = \text{int} \left(\frac{J_D(E_{\max}, x', \theta)}{D} \right), \quad D = \frac{C_{\text{lim}} W(x')}{2^{k_{ADC}} - 1}, \quad (6)$$

здесь k_{ADC} — разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП); $C_{\text{lim}}, C_{\text{lim}} > 1$ — коэффициент, ограничивающий ЦС уровнем $2^{k_{ADC}} - 1$ при флуктуациях АС.

Совокупность формул (1)—(6) представляет собой обобщенную модель формирования проекций в рентгеновской компьютерной томографии.

1.4. Формирование синопграмм в рентгеновской компьютерной томографии

Синопграммой в КТ называется совокупность проекций. Она представляет собой матрицу \mathbf{P} размерностью $M \times N$, где M — количество точек в проекции, а N — количество проекций. Качество реконструкции сечений в КТ определяется параметрами M и N , которые связаны с размером РЧЭ a и шагом по углу Δ_θ следующими соотношениями:

$$N = 2A/a, \quad M = 2\pi/\Delta_\theta. \quad (7)$$

Выражение для формирования синопграммы выглядит следующим образом:

$$\mathbf{P} = \left\{ P_{i_x i_\theta} = P^*(x'_{ix}, \theta_{i_\theta}) \Big| x'_{ix} = -A + \frac{a}{2} + a(i_x - 1), i_x = 1 \dots N; \theta_{i_\theta} = \Delta_\theta(i_\theta - 1), i_\theta = 1 \dots M + 1 \right\}. \quad (8)$$

Для наглядной проверки качества исходных данных в КТ синограммы представляют в графическом виде.

2. РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЕЧЕНИЙ В РЕНТГЕНОВСКОЙ КТ МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ПРОЕКЦИИ С ФИЛЬТРАЦИЕЙ

На вход блока обработки исходной информации поступает синограмма. Результатом обработки синограммы является распределение информативного параметра по сечению ОК. Выше отмечена причина выбора метода ОПФ в качестве АР изображений сечений.

На первом этапе алгоритма осуществляется фильтрация исходных проекций P^* с помощью некоторого фильтра h :

$$P^{**}(x', \theta) = \int P^*(t, \theta) h(x' - t) dt. \quad (9)$$

В качестве фильтров в КТ наиболее часто применяются фильтры с ядрами Рамачандрана—Лакшминараянана (РЛ) [27] и Шеппа—Логана (ШЛ) [28].

На втором этапе реализуется обратная свертка, целью которой является оценка распределения информационного параметра по сечению ОК p — p^* :

$$p^*(x, y) = \int_0^{2\pi} P^{**}(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta. \quad (10)$$

Выражения (9), (10) позволяют оценить любую функцию, определенную на сечении, и для которой известен полный набор проекций (синограмма).

3. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИНОГРАММ В КТ

Алгоритм вычислительного моделирования синограмм и реконструкции изображений сечений в КТ состоит из нескольких основных блоков: исходные данные системы КТ; задание вспомогательных функций по ослаблению и регистрации излучения; описание сечения ОК; формирование идеальной синограммы; выбор рационального значения максимальной энергии рентгеновского излучения; формирование калибровочных функций зависимостей массовых толщин ОК от их толщин в длинах свободного пробега (д.с.п.); формирование синограмм; формирование откорректированных синограмм с их графическим отображением; реконструкция изображений сечений.

3.1. Исходные данные системы рентгеновской компьютерной томографии

В соответствии с принятой схемой формирования синограмм в рентгеновской КТ к исходным данным системы относятся: полуширина линейного РРИ — A , мм; поперечный размер РЧЭ — a , мм; толщина РЧЭ — h_s , мм; материал РЧЭ; шаг по углу — $\Delta\theta$, рад.

3.2. Задание вспомогательных функций по ослаблению и регистрации излучения

Первичные данные для этого блока заимствуются из открытых библиотек по ослаблению гамма-излучения (например, [29]) и сводятся в таблицы МКО-излучения веществом в диапазоне изменения атомного номера от $Z = 1$ (водород) до $Z = 82$ (свинец). Каждому значению Z соответствуют три вектора: уровни энергий гамма-излучения \mathbf{E}_n ; МКО гамма-излучения \mathbf{m} ; среднее значение поглощенной энергии \mathbf{E}_{ab} .

В данном блоке задаются: функции $m(E, Z)$, интерполирующие зависимости МКО m от энергии гамма-излучения E для веществ от водорода до свинца; энергетический спектр источника излучения $f(E, E_{\max})$; энергетические зависимости эффективности регистрации РЧЭ $\varepsilon(E, h_s)$ исходя из его толщины и материала; интерполяции функций $E_{ab}(E, h_s)$.

3.3. Описание сечения объекта контроля

Выше отмечено, что сечение ОК определяется распределениями плотности $\rho(x, y)$ и ЭАН $Z(x, y)$, $(x, y) \in S$. Из анализа выражений (3)—(6) следует, что производительность алгоритма моде-

лирования зависит от сложности вычислений энергетической зависимости $P_E(E, x', \theta)$. В [25] отмечена эффективность замены интегралов в (4), (5) параметрическими интерполяционными зависимостями, например, от массовой толщины. Указанный подход легко реализуем для ОК, для которых $Z(x, y) = \text{const}$, $(x, y) \in S$. Остановимся на подобных ОК.

В КТ широко используются натурные и виртуальные фантомы, которые состоят из фрагментов с сечениями правильной формы. Чаще всего в качестве простых форм используют круги и квадраты. Приведем описания ОК с такими фрагментами.

3.3.1. Сечения фрагментов в форме кругов

Рассмотрим цилиндрическую оболочку с непересекающимися цилиндрическими включениями различной плотности. Оси включений параллельны оси цилиндрической оболочки. Будем рассматривать сечения, перпендикулярные оси оболочки. Такие сечения состоят из фрагментов в форме кругов. Сечение ОК в данном случае описывается набором из векторов \mathbf{r} , \mathbf{r}_0 , $\boldsymbol{\rho}$, $\boldsymbol{\beta}$ с размерностью n_0 и параметрами x_0, y_0 . Здесь \mathbf{r} — вектор радиусов фрагментов, \mathbf{r}_0 — вектор радиусов центров фрагментов, $\boldsymbol{\rho}$ — вектор плотностей материалов фрагментов, $\boldsymbol{\beta}$ — вектор угловой координаты центров фрагментов, x_0, y_0 — координаты смещения оси вращения. Пусть $i, i = 1 \dots n_0$, номер фрагмента, $i = 1$ соответствует собственно оболочке, $i = 2$ — осевой полости, а $i = 3 \dots n_0$ — включениям.

3.3.2. Сечения фрагментов в форме квадратов

Типичным представителем ОК с сечениями фрагментов в форме квадратов являются толстостенные трубы с квадратным сечением. Для рассматриваемого ОК все сечения фрагментов имеют форму квадратов. Сечение ОК определяется совокупностью векторов \mathbf{r} , $\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0$, $\boldsymbol{\rho}$, $\boldsymbol{\theta}$ с размерностью n_0 и параметрами x_0, y_0 . Здесь \mathbf{r} — вектор радиусов вписанных в фрагменты окружностей; $\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0$ — векторы координат центров фрагментов; $\boldsymbol{\rho}$ — вектор плотностей материалов фрагментов; $\boldsymbol{\theta}$ — вектор углов поворота фрагментов; x_0, y_0 — координаты смещения оси вращения. Нумерация фрагментов аналогична описанной выше: $i = 1$ соответствует оболочке; $i = 2$ — осевой полости; $i = 3 \dots n_0$ — включениям оболочки.

3.4. Формирование идеальных синопграмм

Синопграмму назовем идеальной, если информативным параметром является плотность ρ . Для формирования синопграммы воспользуемся подходом, аналогичным аддитивному алгоритму моделирования радиографических изображений [25].

В соответствии с [25], выражение для формирования идеальной синопграммы выглядит следующим образом:

$$P(x', \theta) = H_1(x', \theta)\rho_1 - \sum_{i=2}^{n_0} (\rho_i - \rho_1)H_i(x', \theta), \quad -A \leq x' \leq A, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad (11)$$

здесь $H_i(x', \theta)$, $i = 1 \dots n_0$, — толщины фрагментов ОК по лучу, проходящему через точку x' .

Сложность вычислений идеальных синопграмм по формуле (11) определяется формой фрагментов сечения ОК. Проиллюстрируем это для кругов и квадратов.

3.4.1. Оценка лучевых толщин для сечений фрагментов в форме круга

Формула для оценки толщин фрагментов с номерами $i = 1 \dots n_0$ имеет вид:

$$H_i(x', \theta) = \begin{cases} 2\sqrt{r_i^2 - (x - x_0 - r_0 \cos \beta_i)^2}, & |x - x_0| \leq r_0 \cos \beta_i \\ 0, & |x - x_0| > r_0 \cos \beta_i \end{cases}, \quad \begin{cases} x - x_0 = x' \cos \theta - y' \sin \theta \\ y - y_0 = x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{cases} \quad (12)$$

Выражение (12) в совокупности с (1) легко реализуются в системе MathCad.

3.4.1. Оценка лучевых толщин для сечений фрагментов в форме квадрата

Квадрат определяется координатами центра и координатами угловых точек. Поэтому на первом этапе для i -го фрагмента вычисляются указанные координаты. Пусть имеется локальная декартова

система координат $X''O''Y''$ с центром в центре квадратного фрагмента, оси параллельны сторонам квадрата. Набор координат угловых точек фрагментов (x''_{ji}, y''_{ji}) , $j = 1 \dots 4$, в соответствующих локальных системах координат описывается выражением:

$$\begin{bmatrix} x''_{1i} & y''_{1i} \\ x''_{2i} & y''_{2i} \\ x''_{3i} & y''_{3i} \\ x''_{4i} & y''_{4i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_i & r_i \\ r_i & r_i \\ -r_i & -r_i \\ r_i & -r_i \end{bmatrix}. \quad (13)$$

С учетом поворота квадратных фрагментов на углы β_i и смещения центров в системе XOY координаты угловых точек вычисляются по формуле:

$$\begin{bmatrix} x_{ji} \\ y_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & -\sin \beta_i \\ \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x''_{ji} \\ y''_{ji} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x0_i \\ y0_i \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Аналогичным образом рассчитываются координаты в системе координат $X'OY'$, получаемой поворотом системы XOY относительно точки O на угол θ :

$$\begin{bmatrix} x'_{ji} \\ y'_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ji} \\ y_{ji} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Далее для $i, i = 1 \dots n_0$, матрицы \mathbf{XY}_i сортируются по первому столбцу по возрастанию:

$$\mathbf{XY}_i = \begin{bmatrix} x'_{1i} & y'_{1i} \\ x'_{2i} & y'_{2i} \\ x'_{3i} & y'_{3i} \\ x'_{4i} & y'_{4i} \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{XY}_i^* = \text{csort}(\mathbf{XY}_i, 1) = \begin{bmatrix} x_{1i}^* & y_{1i}^* \\ x_{2i}^* & y_{2i}^* \\ x_{3i}^* & y_{3i}^* \\ x_{4i}^* & y_{4i}^* \end{bmatrix}, \quad (16)$$

здесь $\text{csort}(\mathbf{XY}_i, 1)$ — процедура сортировки по первому столбцу по возрастанию.

Оценка толщины фрагментов по лучу находится по формуле:

$$H_i(x', \theta) = \begin{cases} 0, & (x' < x_{1i}^*) \vee (x' > x_{4i}^*) \\ 2r_i, & (x_{1i}^* \leq x' \leq x_{4i}^*) \wedge ((x_{1i}^* = x_{2i}^*) \vee (x_{3i}^* = x_{4i}^*)) \\ 2\sqrt{2}r_i, & x_{2i}^* = x_{3i}^* \\ \left| \frac{y_{2i}^* - y_{1i}^*}{x_{2i}^* - x_{1i}^*} (x' - x_{1i}^*) - \frac{y_{3i}^* - y_{1i}^*}{x_{3i}^* - x_{1i}^*} (x' - x_{1i}^*) \right|, & (x_{1i}^* \leq x' < x_{2i}^*) \wedge (x_{1i}^* \neq x_{2i}^*) \\ \left| \frac{y_{3i}^* - y_{1i}^*}{x_{3i}^* - x_{1i}^*} (x' - x_{1i}^*) + y_{1i}^* - \frac{y_{4i}^* - y_{2i}^*}{x_{4i}^* - x_{2i}^*} (x' - x_{2i}^*) - y_{2i}^* \right|, & (x_{2i}^* \leq x' < x_{3i}^*) \wedge (x_{2i}^* \neq x_{3i}^*) \\ \left| \frac{y_{4i}^* - y_{2i}^*}{x_{4i}^* - x_{2i}^*} (x' - x_{2i}^*) + y_{2i}^* - \frac{y_{4i}^* - y_{3i}^*}{x_{4i}^* - x_{3i}^*} (x' - x_{3i}^*) - y_{3i}^* \right|, & (x_{3i}^* \leq x' \leq x_{4i}^*) \wedge (x_{3i}^* \neq x_{4i}^*) \end{cases}. \quad (17)$$

Выражения (13)—(17) позволяют оценить лучевые толщины сечений фрагментов в виде квадрата для любых значений x' и θ .

Приведенные выше формулы (12)—(17) являются основой алгоритмов формирования идеальных синопграмм для сечений фрагментов в форме круга и квадрата.

3.5. Выбор максимальной энергии рентгеновского излучения

Выбор максимальной энергии рентгеновского излучения существенным образом влияет на качество реконструкции изображений сечений в КТ [30]. Уравнение для выбора E_{\max} аналогично указанному в [30]:

$$\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h_s) dE}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \exp\left(-m(E, Z) \max_{x' \in [-A, A], \theta \in [0, 2\pi]} P(x', \theta)\right) \varepsilon(E, h_s) dE} = 2. \quad (18)$$

Правая часть уравнения (18) может быть уменьшена или увеличена. Значение $P_{\max} = \max_{x' \in [-A, A], \theta \in [0, 2\pi]} P(x', \theta)$ равно максимальной массовой толщине ОК.

3.6. Формирование калибровочных функций — зависимостей массовых толщин объекта контроля от их толщин в длинах свободного пробега

Из определения идеальной синопаммы следует необходимость оценки массовых толщин ОК по всем лучам. Для этого по результатам натурального или вычислительного эксперимента определяются зависимости коэффициентов ослабления рентгеновского излучения от массовой толщины ρH .

Воспользуемся алгоритмом формирования калибровочных функций для однородных по ЭАН ОК, приведенным в [31]. В качестве тестового ОК выступает ступенчатый объект со ступенями толщиной от $(\rho H)_1 = \rho H_{\min} = 0$ г/см² до $(\rho H)_l = \rho H_{\max} = P_{\max}$ г/см². Формула связи оценки толщины ОК в д.с.п. Y с массовой толщиной ρH имеет вид:

$$Y(E_{\max}, \rho H) = -\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \exp(-m(E, Z) \rho H) \varepsilon(E, h_s) dE / D}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h_s) dE / D}. \quad (19)$$

На вход алгоритма формирования калибровочных функций поступает таблица $\mathbf{B} = ((\rho H)_n, Y(E_{\max}, (\rho H)_n))$, $n = 1 \dots l$. На основе таблицы \mathbf{B} строится аналитическая функция F :

$$\rho H = F(Y). \quad (20)$$

Формула (20) позволяет оценить идеальные синопаммы по реальным.

3.7. Формирование реальных синопамм с их графическим отображением

На вход алгоритма формирования синопамм, основанного на выражениях (3)—(8), поступает идеальная синопамма. Эта синопамма для ОК, состоящего из конечного числа фрагментов с различной плотностью, описывается выражением (11). Детальная реализация алгоритма осуществляется для конкретных форм фрагментов сечений ОК, например, кругов и квадратов, см. (12)—(17). В результате применения алгоритма для конкретного ОК формируется идеальная синопамма $\mathbf{P} = \{P_{i_x i_\theta} = P(x'_x, \theta_{i_\theta}) : i_x = 1 \dots N; i_\theta = 1 \dots M + 1\}$.

Связь идеальной синопаммы \mathbf{P} и реальной синопаммы $\mathbf{P}^* = \{P_{i_x i_\theta}^* : i_x = 1 \dots N; i_\theta = 1 \dots M + 1\}$ описывается выражением:

$$P_{i_x i_\theta}^* = -\ln \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \exp(-m(E, Z) P_{i_x i_\theta}^*) \varepsilon(E, h_s) dE / D}{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h_s) f(E, E_{\max}) \varepsilon(E, h_s) dE / D}. \quad (21)$$

Синограмма \mathbf{P}^* преобразуется в полутоновое изображение \mathbf{G}^* следующим образом:

$$G_{i_x, i_0}^* = 255 - 255 \operatorname{int} \left(\frac{P_{i_x, i_0}^* - \min(\mathbf{P}^*)}{\max(\mathbf{P}^*) - \min(\mathbf{P}^*)} \right). \quad (22)$$

Графическое представление синограммы необходимо не только для наглядного представления информации на одном изображении, но и для анализа возможных искажений при сканировании или вычислительном моделировании.

3.8. Корректировка синограмм

В синограммах толщины ОК по лучам измеряются в д.с.п., что делает невозможной точную оценку распределения плотности по сечению объекта методом КТ. Корректировка синограмм сводится к перерасчету толщин ОК по лучам в д.с.п. в массовые толщины ОК по соответствующим лучам.

Корректировка синограммы \mathbf{P}^* осуществляется в соответствии с преобразованием (20). Выражение для формирования итоговой синограммы \mathbf{P}_C имеет вид:

$$\mathbf{P}_C = \left\{ P_{C, i_x, i_0} = F(P_{i_x, i_0}^*) : i_x = 1 \dots N; i_0 = 1 \dots M + 1 \right\}. \quad (23)$$

Графическое изображение синограммы \mathbf{P}^* формируется аналогично формуле (22).

3.9. Реконструкция изображений сечений методом обратной свертки с фильтрацией

Алгоритм и программа реконструкции изображений сечений ОК в КТ являются самостоятельными и связаны между собой текстовым файлом. В текстовом файле записана синограмма, например, матрица \mathbf{Pr} . В имени файла содержится информация о размере РЧЭ a .

После считывания матрицы \mathbf{Pr} определяется количество детекторов в линейке N и количество проекций M :

$$N = \operatorname{rows}(\mathbf{Pr}), M = \operatorname{cols}(\mathbf{Pr}), \quad (24)$$

здесь $\operatorname{rows}(\mathbf{Pr})$, $\operatorname{cols}(\mathbf{Pr})$ — количество строк и столбцов в матрице \mathbf{Pr} .

Далее задаются фильтры с ядрами РЛ и ШЛ.

3.9.1. Фильтры Рамачандрана—Лакшминараянана и Шеппа—Логана

Фильтр Рамачандрана—Лакшминараянана f_{RL} определяется формулой [27]:

$$f_{RL, i} = \begin{cases} \frac{1}{4a^2}, & i = 0, \\ 0, & i = 2k, k = \pm 1, \pm 2, \dots, i = -Nh \dots Nh, Nh = \operatorname{int} \left(\frac{N}{2} \right), \\ \frac{-1}{\pi^2 a^2 i^2}, & i = 2k - 1, k = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (25)$$

Соответствующее выражение для фильтра Шеппа—Логана f_{ShL} имеет вид [28]:

$$f_{ShL, i} = \frac{1}{\pi^2 a^2} \left(\frac{1}{1 - 4i^2} \right), i = -Nh \dots Nh, Nh = \operatorname{int} \left(\frac{N}{2} \right). \quad (26)$$

3.9.2. Фильтрация исходных проекций

Фильтрация исходных проекций \mathbf{Pr} осуществляется в соответствии с выражением (8), которое в дискретном виде выглядит следующим образом:

$$Prf_{i_x i_0} = a \sum_{i_f=-N_x}^{N_x} Prf_{i_f i_0} \begin{cases} f_{i_x-i_f}, & -N_x \leq i_x - i_f < N_x \\ 0, & (i_x - i_f < -N_x) \vee (i_x - i_f \geq N_x) \end{cases}. \quad (27)$$

В выражении (27) в качестве фильтра f используется фильтр с ядром РЛ f_{RL} (26) или фильтр с ядром ШЛ f_{ShL} (27), или их модификации.

3.9.3. Обратная проекция

Отфильтрованная проекция **Prf** поступает на вход блока обратного проецирования. В соответствии с формулой (9) оценка информативного параметра в точке сечения (x, y) представляет собой интеграл по всем лучам, проходящим через отмеченную точку.

В рассматриваемом случае информативным параметром является плотность ρ , поэтому оценка плотности $\tilde{\rho}$ в точке с координатами (x, y) находится по формуле:

$$\tilde{\rho}(x, y) \approx h_0 \sum_{i_0=1}^M Prf^*(x \cos \theta_{i_0} + y \sin \theta_{i_0}, \theta_{i_0}). \quad (28)$$

Функция $Prf^*(x^*, \theta_{i_0})$ для фиксированного значения i_0 является интерполяцией дискретной зависимости $Prf_{i_x i_0}$ от $x^*_{i_x}$.

3.9.4. Формирование изображений сечений

На первом этапе формируется цифровое изображение $\tilde{\rho}$, представляющее распределение оценки информативного параметра (плотности) по сечению ОК.

Пусть изображение имеет форму прямоугольника с размерами $N_x \times N_y$ пикселей. Тогда матрица $\tilde{\rho} = \{\rho_{i_x i_y}, i_x = 1 \dots N_x, i_y = 1 \dots N_y\}$ описывается выражением:

$$\tilde{\rho} = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{\rho}(x_{i_x}, y_{i_y}), \quad x_{i_x}^2 + y_{i_y}^2 \leq A^2 \\ 0, \quad x_{i_x}^2 + y_{i_y}^2 > A^2, \quad x_{i_x} = -A + \frac{2A}{N_x - 1}(i_x - 1), \quad y_{i_y} = -A + \frac{2A}{N_y - 1}(i_y - 1) \end{array} \right\}. \quad (29)$$

На втором этапе на основе изображения $\tilde{\rho}$ по формуле, аналогичной (23), формируется соответствующее полутоновое изображение \mathbf{G}_p .

Целью работы является построение вычислительной модели рентгеновского КТ с оценкой плотности по сечению ОК, поэтому изображение $\tilde{\rho}$ подвергается обработке с целью определения отклонений оценок плотности от их реальных значений.

4. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИНОГРАММ В КТ

Для иллюстрации возможностей алгоритмов моделирования синограмм, их корректировки и реконструкции распределений плотности по сечению ОК были выбраны объекты, сечения фрагментов которых имеют форму круга и квадрата. Все фрагменты ОК являются однородными по ЭАН ($Z = 13$), но с переменной плотностью.

Разработанные алгоритмы реализованы в системе MathCad 15 в виде программ формирования синограмм и реконструкции изображений. Программа формирования синограмм является универсальной за исключением блока описания ОК с вычислением его толщин по лучам. Программа реконструкции универсальна, она содержит переключаемые блоки вычисления коэффициентов фильтров РЛ и ШЛ. Связь вышеуказанных программ осуществляется через текстовой файл, соответствующий синограмме **Pr**.

Линейка детекторов рентгеновского излучения имеет размер $2A = 70$ мм. Материал РЧЭ — вольфрамат кадмия, поперечный размер РЧЭ $a = 0,1$ мм, толщина РЧЭ $h_s = 0,3$ мм. На фронтальную поверхность каждого РЧЭ падает $N_0 = 10^6$ фотонов.

4.1. Объект с сечениями фрагментов в форме кругов

Сечение ОК характеризуется следующими параметрами: внешний радиус толстостенной цилиндрической оболочки $r_1 = 25$ мм; радиус внутренней цилиндрической полости $r_2 = 10$ мм; радиусы локальных фрагментов оболочки, $r_3 = r_4 = \dots = r_{14} = 4$ мм; радиальные координаты центров фрагментов $r0_1 = r0_2 = 0$ мм, $r0_3 = r0_4 = \dots = r0_{14} = 17,5$ мм; угловые координаты центров

фрагментов $\beta_1 = \beta_2 = 0$, $\beta_i = \pi(i-3)/6$, $i = 3 \dots 14$; плотности материалов фрагментов $\rho_1 = 2,7 \text{ г/см}^3$, $\rho_2 = 0 \text{ г/см}^3$, $\rho_i = 0,2(i-2) \text{ г/см}^3$, $i = 3 \dots 14$.

Количество проекций $M = 1440$. Максимальное значение массовой толщины по лучам для рассматриваемого объекта $P_{\max} = 11,7 \text{ г/см}^2$. Рациональное значение максимальной энергии рентгеновского излучения выбрано из условия (19) $E_{\max} = 400 \text{ кэВ}$.

На рис. 2 приведены изображения синограммы для сечения анализируемого объекта и реконструированные методом ОПФ изображения сечения.

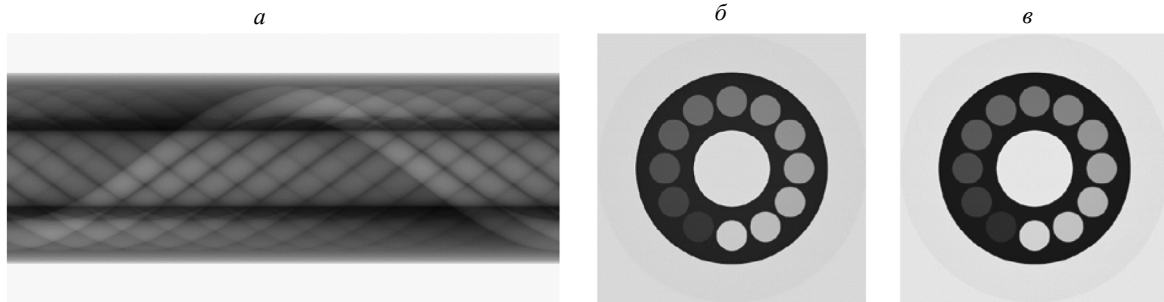


Рис. 2. Объект с сечениями фрагментов в форме кругов:
а — синограмма; б — реконструкция (фильтр РЛ); в — реконструкция (фильтр ШЛ).

Время формирования синограммы для исследуемого объекта на ноутбуке с процессором Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU с частотой 2,30 ГГц не превосходит 85 с. Время реконструкции изображений с фильтром РЛ не превосходит 11 мин, а с фильтром ШЛ — 10,3 мин. Указанной производительности программ достаточно для использования в учебном процессе и для детального анализа влияния параметров систем рентгеновской КТ на качество реконструкции изображений в режиме визуализации. Реконструированные изображения для фильтров РЛ и ШЛ близки друг к другу по качеству.

Для оценки качества моделирования систем КТ, функционирующих в режиме измерения распределений плотности по сечению ОК, определим зависимость плотности $\tilde{\rho}_c$ от угла φ по окружности радиусом $r_c = r_0_3 = 17,5 \text{ мм}$ с центром в геометрическом центре сечения. Формула для оценки зависимости $\tilde{\rho}_c(\varphi)$ имеет вид:

$$\tilde{\rho}_c(\varphi) = \tilde{\rho}(r_c \cos \varphi, r_c \sin \varphi). \quad (30)$$

На рис. 3 приведены копии графиков из программы MathCad зависимостей $\tilde{\rho}_c(\varphi)$ для используемых фильтров РЛ и ШЛ.

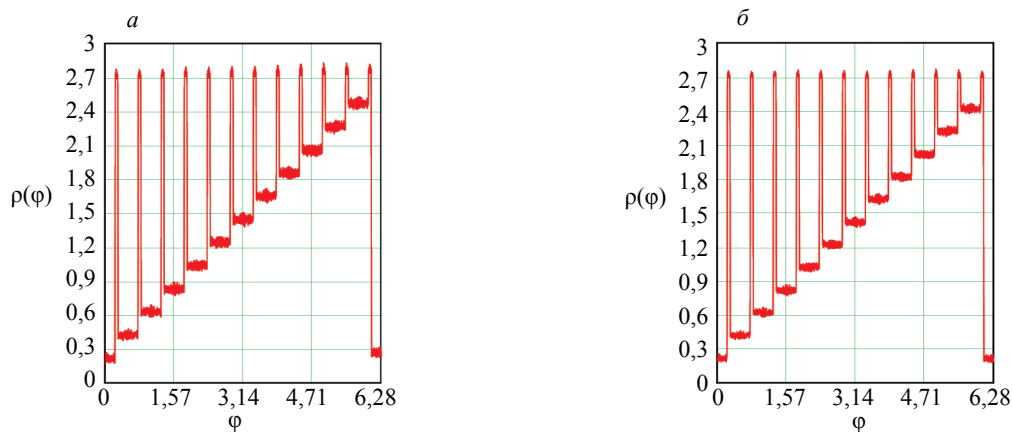


Рис. 3. Угловые зависимости $\tilde{\rho}_c(\varphi)$ для ОК с сечениями фрагментов в форме кругов:
а — фильтр с ядром РЛ; б — фильтр с ядром ШЛ.

Из анализа графиков, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о высокой точности оценки распределения плотности по сечению рассматриваемого ОК методом КТ для реконструкции способом обратной проекции с фильтрацией с фильтрами РЛ и ШЛ.

4.2. Объект с сечениями фрагментов в форме квадратов

Сечения рассматриваемого ОК характеризуются параметрами: радиус вписанной окружности в толстостенную оболочку с квадратным сечением $r_1=25$ мм; радиус вписанной окружности во внутреннюю полость с квадратным сечением $r_2=10$ мм; радиусы вписанных окружностей в сечения фрагментов квадратной формы, расположенных внутри оболочки, $r_3=r_4=\dots=r_{10}=5$ мм; координаты центров фрагментов $XO_1=Y0_1=XO_2=Y0_2=0$ мм, $XO_3=Y0_3=-17,5$ мм, $XO_4=Y0_4=-17,5$ мм, $XO_5=Y0_5=-17,5$ мм, $XO_6=Y0_6=-17,5$ мм, $XO_7=Y0_7=17,5$ мм, $XO_8=Y0_8=17,5$ мм, $XO_9=Y0_9=17,5$ мм, $XO_{10}=Y0_{10}=17,5$ мм; углы вращения фрагментов $\beta_1=\beta_2=0$, $\beta_i=\pi(i-3)/12$, $i=3\dots14$; плотности материалов фрагментов $\rho_1=2,7$ г/см³, $\rho_2=0$ г/см³, $\rho_i=0,3(i-2)$ г/см³, $i=3\dots10$.

Количество проекций $M=1440$. Максимальное значение массовой толщины по лучам для рассматриваемого объекта $P_{\max}=13,8$ г/см². Рациональное значение максимальной энергии рентгеновского излучения выбрано из условия (19) $E_{\max}=450$ кэВ.

На рис. 4 приведены изображения синограммы для сечения исследуемого ОК и результаты реконструкции. В алгоритме ОПФ применялись фильтры с ядрами РЛ и ШЛ.

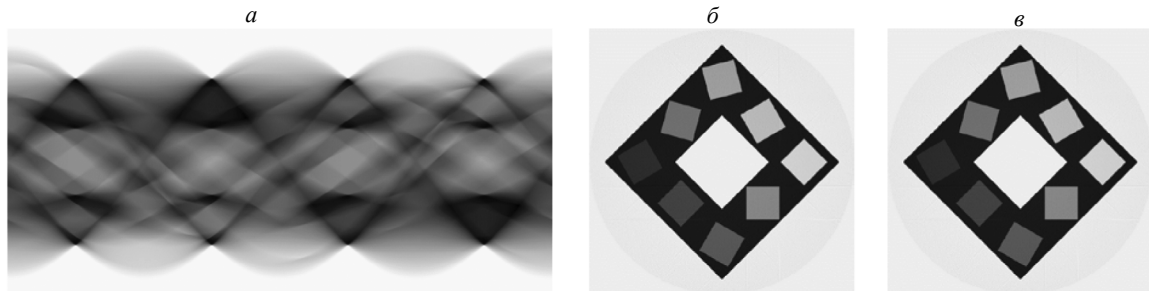


Рис. 4. Объект с сечениями фрагментов в форме квадратов:
а — синограмма; б — реконструкция (фильтр РЛ); в — реконструкция (фильтр ШЛ).

Время симуляции синограммы для анализируемого ОК на ноутбуке с процессором Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU с частотой 2,30 ГГц не превосходит 129 с. Время формирования изображений сечений с фильтром РЛ не превосходит 15 мин, а с фильтром ШЛ — 14 мин. Такой производительности программ достаточно для применения в учебном процессе и для тщательного анализа влияния параметров систем рентгеновской КТ на качество визуализации изображений сечений. Визуализированные изображения для фильтров РЛ и ШЛ близки друг к другу по качеству.

Для рассматриваемого ОК точность измерения зависимости плотности $\tilde{\rho}_c$ от угла φ оценивается по линии, соединяющей центры локальных фрагментов оболочки. На рис. 5 приведены копии

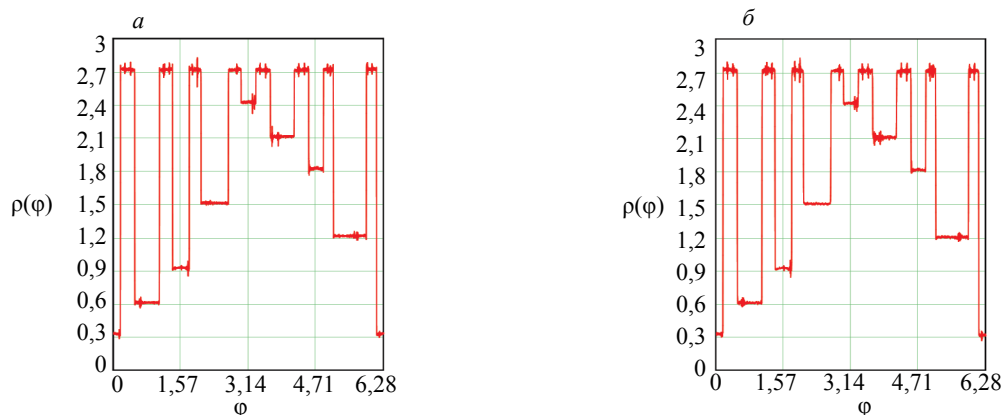


Рис. 5. Угловые зависимости $\tilde{\rho}_c(\varphi)$ для ОК с сечениями фрагментов в виде квадратов:
а — фильтр с ядром РЛ; б — фильтр с ядром ШЛ.

графиков из программы MathCad зависимостей $\tilde{\rho}_c(\varphi)$ применительно к исследуемому ОК для фильтров РЛ и ШЛ. Сравнение графиков подтверждает вывод о высокой точности оценки распределения плотности по сечению анализируемого объекта методом КТ для реконструкции способом ОПФ с фильтрами РЛ и ШЛ.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Качество реконструкций внутренней структуры ОК с сечениями фрагментов в форме кругов и аналогичных объектов из работы [32] визуально имеют один уровень качества. К такому же выводу приходим в результате сравнения рис. 4б, в с реконструированными изображениями сечений универсального фантома для КТ с похожими фрагментами [33]. В обоих случаях точность оценки плотности для аналогичных материалов фрагментов не уступает соответствующим экспериментальным значениям из [32]. Из сказанного выше можно сделать вывод об адекватности разработанной вычислительной модели для ОК из однородных по ЭАН материалов с фрагментами с сечениями в форме круга и квадрата.

Вкратце обсудим подходы к оценке распределения плотности методом КТ для ОК с более сложными по форме сечениями фрагментов или с отличием фрагментов по ЭАН.

5.1. Сечение объекта с фрагментами сложной формы из однородных по эффективному атомному номеру материалов

Специфика ОК влияет исключительно на процесс формирования синограмм.

Для модификации блока описания сечений ОК может быть использован подход из [25]. Данный подход основан на выражении (11) с использованием информации о формах, размерах и материалах фрагментов сечения ОК. В [25] упоминается также идея, согласно которой на основе изображения фрагмента с пикселями малого размера строятся изображения с пикселями существенно большего размера. Модифицируем данную идею, изменив способ получения исходных изображений фрагментов.

Форма и размеры технических объектов известны; для них, как правило, существует документация с чертежами. В соответствии со сказанным выше достаточно рассмотреть принцип описания одного фрагмента сложной формы. Пусть на плоскости задана некоторая непрерывная замкнутая кривая W , которая является внешней границей некоторой плоской фигуры (фрагмента) Φ . Чертеж сечения фрагмента может быть представлен в бумажном или электронном виде. Чертеж переводится в цифровое изображение в формате *.bmp с максимально возможным разрешением. Цифровое изображение трансформируется в идеальную синограмму, которая обрабатывается согласно описанному выше алгоритму.

На рис. 6 приведены истинное изображение сечения алюминиевого ОК в форме звезды с шестнадцатью лучами, синограмма и результаты реконструкции. Радиус описанной окружности $R = 25$ мм, радиус вписанной окружности $r = 20$ мм. Количество проекций $M = 1440$. Количество детекторов в линейке $N = 700$. Максимальное значение массовой толщины по лучам для исследуемого объекта $P_{\max} = 13,5$ г/см², $E_{\max} = 450$ кэВ.

Время формирования синограммы около часа, большая часть времени затрачивается на оценку идеальных проекций. Время реконструкции близко к 13 мин. Следует отметить визуальное высокое качество реконструкции. Погрешность оценки плотности не превышает 2 %. В целом качество

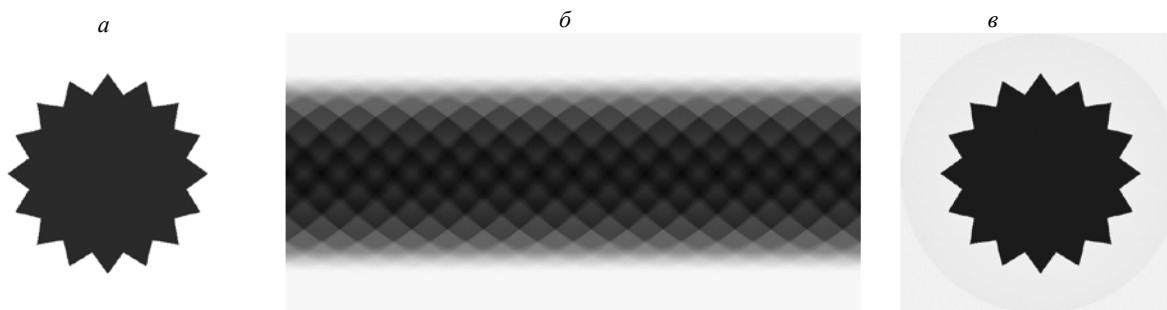


Рис. 6. Объект с сечением фрагментов в форме звезды:
а — изображение сечение объекта; б — синограмма; в — реконструкция (фильтр ШЛ).

реконструкции близко к качеству экспериментальных изображений сечений, приведенных в [34], для ОК в виде шестеренок.

5.2. Сечения объектов с отличающимися по Z фрагментами

Наличие в ОК фрагментов с материалами с различными ЭАН приводят к существенному смещению оценок плотности. Для устранения отмеченного смещения в КТ применяются методы дуальных энергий (МДЭ). Методы дуальных энергий в КТ основаны на просвечивании ОК гамма- или рентгеновским излучением с двумя энергиями [35, 36] и последующей оценке распределений ЭАН и плотности. Максимальной производительностью обладает реализация МДЭ [37], в которой в качестве источников излучения применяются моноэнергетические гамма-радионуклиды.

Энергетические спектры моноэнергетических радионуклидов описываются δ -функциями. В соответствии с этим и формулами (4), (5) система, связывающая параметры ОК и проекции для энергий гамма-излучения E_1 и E_2 , имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} P(E_1, x', \theta) &= \int_{L(x', \theta)} m(E_1, Z(y')) \rho(y') dy' = P_1(x', \theta); \\ P(E_2, x', \theta) &= \int_{L(x', \theta)} m(E_2, Z(y')) \rho(y') dy' = P_2(x', \theta). \end{aligned} \quad (31)$$

В программе имитации синограмм формируются две синограммы \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 . В качестве информативного параметра при реконструкции изображений сечений выступает ЛКО излучения, но представление проекций в виде (31) позволяет осуществить необходимую модификацию алгоритма с целью одновременной оценки распределений плотности $\tilde{\rho}(x, y)$ — $\tilde{\rho}$ и ЭАН $\tilde{Z}(x, y)$ — \tilde{Z} . В результате реконструкции оцениваются распределения:

$$\begin{aligned} \tilde{m}(E_1, \tilde{Z}(x, y)) \tilde{\rho}(x, y) &= \tilde{\mu}(E_1, x, y); \\ \tilde{m}(E_2, \tilde{Z}(x, y)) \tilde{\rho}(x, y) &= \tilde{\mu}(E_2, x, y). \end{aligned} \quad (32)$$

Оценка распределения ЭАН $\tilde{Z}(x, y)$ осуществляется по формуле, близкой к [36]:

$$\tilde{Z}(x, y) = G(Q(x, y)) = G\left(\tilde{m}(E_1, \tilde{Z}(x, y)) / \tilde{m}(E_2, \tilde{Z}(x, y))\right). \quad (33)$$

Функция G определяется на стадии калибровочных испытаний по образцам из различных материалов, отличающихся по ЭАН.

Рассмотрим ОК с сечениями фрагментов в форме кругов с вариацией плотности и ЭАН. Размеры фрагментов и параметры — как в пункте 4.1. Локальные фрагменты в оболочке разделены на шесть групп: $Z = 6$ ($\rho = 1,5$ г/см³; 2,2 г/см³); $Z = 9$ ($\rho = 1,5$ г/см³; 2,2 г/см³); $Z = 17$ ($\rho = 2$ г/см³; 2,5 г/см³); $Z = 22$ ($\rho = 2$ г/см³; 3 г/см³); $Z = 26$ ($\rho = 3$ г/см³; 5 г/см³); $Z = 29$ ($\rho = 3$ г/см³; 5 г/см³). Параметры сканирования идентичны примеру из раздела 4.1.

На рис. 7 приведены синограммы для энергий γ -излучения $E_1 = 100$ кэВ и $E_2 = 225$ кэВ, результаты предварительной реконструкции, оценок распределений ЭАН и плотности. Применена палитра: $Z = 6$ — красный; $Z = 9$ — желтый; $Z = 13$ — зеленый; $Z = 17$ — голубой; $Z = 22$ — синий; $Z = 26$ — ярко-фиолетовый; $Z = 29$ — черный.

Время формирования двух синограмм для моноэнергетических источников излучения для упомянутого выше ноутбука не превосходит двух минут. Общее время реконструкции близко к получасу. Данные, представленные на рис. 7, иллюстрируют возможность одновременной оценки распределений плотности и ЭАН по сечению ОК. Погрешности оценок плотности и ЭАН материалов фрагментов ОК, полученных в результате вычислительного эксперимента, не превосходят уровни погрешностей оценок плотности и ЭАН материалов фрагментов близкого по структуре ОК [37].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведена вычислительная модель рентгеновской компьютерной томографии с функцией оценки распределения плотности по сечению объекта контроля в геометрии параллельного пучка.

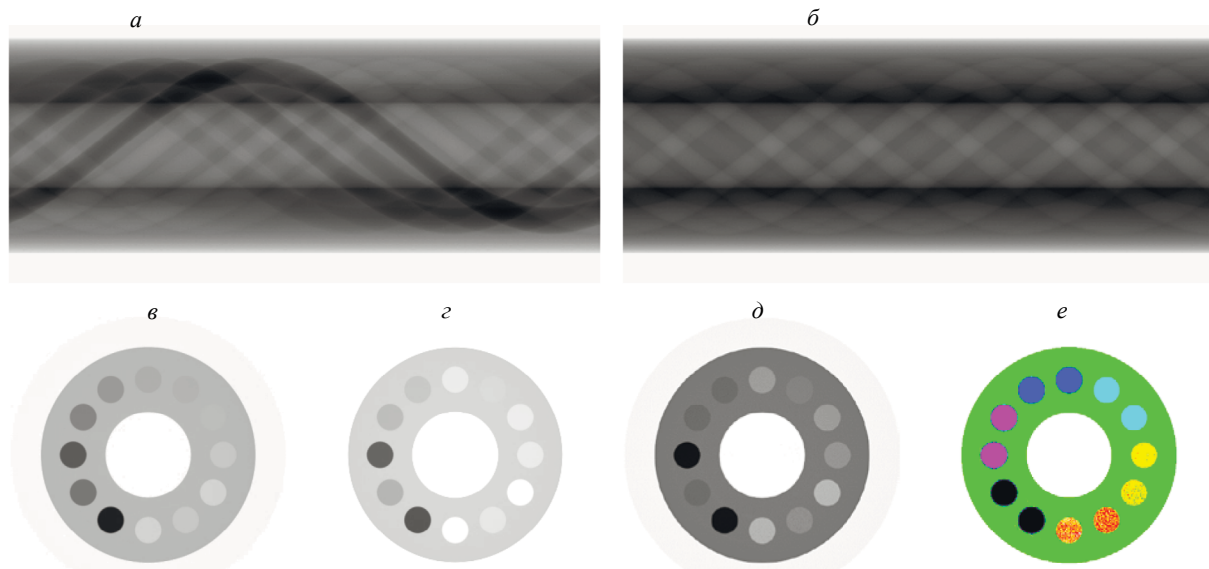


Рис. 7. Сечения ОК с фрагментами, отличающимися по ЭАН материалов:

a — синограмма для энергии E_1 ; b — синограмма для энергии E_2 ; v — реконструкция ЛКО для энергии E_1 ; z — реконструкция ЛКО для энергии E_2 ; d — реконструкция ρ ; e — реконструкция Z .

Алгоритм моделирования состоит из блока формирования синограмм и блока реконструкции изображений сечений объекта. Алгоритм реализован в системе математических вычислений MathCad. Работоспособность алгоритма проиллюстрирована для объектов, сечения фрагментов которых имеют формы кругов и квадратов и однородны по эффективному атомному номеру материалов. Продемонстрирована возможность исследования объектов с сечениями фрагментов сложной формы на примере многолучевой звезды. Предлагаемый алгоритм моделирования дополнен методом дуальных энергий, позволяющим одновременно оценить распределения плотности и эффективного атомного номера по сечению объекта. Эффективность метода дуальных энергий проиллюстрирована на примере объектов с фрагментами с сечениями в форме кругов при вариации плотности и эффективного атомного номера материалов фрагментов. Разработанные вычислительные модели и реализующие их программы в системе MathCad предназначены для выбора и оценки параметров систем рентгеновской компьютерной томографии с функцией оценки плотности по сечению исследуемого объекта на стадии проектирования и для использования в учебном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Du Plessis A., Boshoff W.P. A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 199. P. 637—651.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.049>
2. Brierley N., Nye B., McGuinness J. Mapping the spatial performance variability of an X-ray computed tomography inspection // *NDT & E International*. 2019. V. 107. No. article 102127.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102127>
3. Zikmund T., Šalplachta J., Zatočilová A., Břínek A., Pantělejev L., Štěpánek R., Koutný D., Paloušek D., Kaiser J. Computed tomography based procedure for reproducible porosity measurement of additive manufactured samples // *NDT & E International*. 2019. V. 103. P. 111—118.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.02.008>
4. Du Z., Hu Y., Ali Buttar N., Mahmood A. X-ray computed tomography for quality inspection of agricultural products: A review // *Food science & nutrition*. 2019. V. 7. No. 10. P. 3146—3160.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.1179>
5. Villarraga-Gómez H., Thousand J.D., Smith S.T. Empirical approaches to uncertainty analysis of X-ray computed tomography measurements: a review with examples // *Precision Engineering*. 2020. V. 64. P. 249—268.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.03.004>
6. Lüthi M., Bircher B.A., Meli F., Küng A., Thalmann R. X-ray flat-panel detector geometry correction to improve dimensional computed tomography measurements // *Measurement Science and Technology*. 2019. V. 31. No. 3. No. article 035002.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab52b1>

7. Körner L., Lawes S., Bate D., Newton L., Senin N., Leach R. Increasing throughput in X-ray computed tomography measurement of surface topography using sinogram interpolation // *Measurement Science and Technology*. 2019. V. 30. No. 12. No. article 125002.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab37e5>
8. Busi M., Mohan K.A., Dooraghi A.A., Champley K.M., Martz H.E., Olsen U.L. Method for system-independent material characterization from spectral X-ray CT // *NDT & E International*. 2019. V. 107. No. article 102136. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102136>
9. Fuchs T., Hanke R. Task-driven design of X-ray systems for industrial inspection / 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record // IEEE. 2008. P. 523—527.
<https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2008.4775230>
10. Yong Y., Fei L., Zhang T., Chun-guang X., Ming-chuan Z., Jing-rui R. Design of synchronous projection data acquisition system for cone beam CT based on manipulator / 2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT) // IEEE. 2016. P. 190—194. <https://doi.org/10.1109/FENDT.2016.7992022>
11. Xiao K., Han Y., Xi X., Yan B., Bu H., Li L. A parameter division based method for the geometrical calibration of X-ray industrial cone-beam CT // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 48970—48977.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2865124>
12. Hsieh J. *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances* / 3rd rev. ed. SPIE Press, Bellingham. USA. 2015.
13. Liu X., Lee H.K. A simulation study of the spent nuclear fuel cask condition evaluation using high energy X-ray computed tomography // *NDT & E International*. 2016. V. 80. P. 58—64.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.02.008>
14. Askari M., Taheri A., Movafeghi A. Industrial gamma computed tomography using high aspect ratio scintillator detectors (A Geant4 simulation) // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2019. V. 923. P. 109—117.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.039>
15. Hiller J., Reindl L.M. A computer simulation platform for the estimation of measurement uncertainties in dimensional X-ray computed tomography // *Measurement*. 2012. V. 45. No. 8. P. 2166—2182.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.05.030>
16. Yang Y., Wu Y.C., Li L., Zhang S.Y., Dong K.G., Zhang T.K., Yu M.H., Zhang X.H., Zhu B., Tan F., Yan Y.H., Li G., Fan W., Lu F., Zhao Z.Q., Zhou W.M., Cao L.F., Gu Y.Q. Design and characterization of high energy micro-CT with a laser-based X-ray source // *Results in Physics*. 2019. V. 14. No. article 102382.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102382>
17. Peterzol A., Létang J.M., Babot D. A beam stop based correction procedure for high spatial frequency scatter in industrial cone-beam X-ray CT // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2008. V. 266. No. 18. P. 4042—4054.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.07.005>
18. Pan X., Sidky E.Y., Vannier M. Why do commercial CT scanners still employ traditional, filtered back-projection for image reconstruction? // *Inverse problems*. 2009. V. 25. No. 12. No. article 123009.
<http://dx.doi.org/10.1088/0266-5611/25/12/123009>
19. Shi L., Liu B., Yu H., Wei C., Wei L., Zeng L., Wang G. Review of CT image reconstruction open source toolkits // *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2020. №. Preprint. P. 1—22.
<https://doi.org/10.3233/XST-200666>
20. Kengyelics S.M., Treadgold L.A., Davies A.G. X-ray system simulation software tools for radiology and radiography education // *Computers in Biology and Medicine*. 2018. V. 93. P. 175—183.
<https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2017.12.005>
21. Sarantites D.G., Sobotka L.G. Computational templates for introductory nuclear science using Mathcad // *American Journal of Physics*. 2013. V. 81. No. 1. P. 44—49.
<https://doi.org/10.1119/1.4764079>
22. Duchesne M.J., Moore F., Long B.F., Labrie J. A rapid method for converting medical Computed Tomography scanner topogram attenuation scale to Hounsfield Unit scale and to obtain relative density values // *Engineering Geology*. 2009. V. 103. No. 3—4. P. 100—105.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.06.009>
23. Sakata D., Haga A., Kida S., Imae T., Takenaka S., Nakagawa K. Effective atomic number estimation using kV-MV dual-energy source in LINAC // *Physica Medica*. 2017. V. 39. P. 9—15.
<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.06.010>
24. 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., Кайроланов Д.У., Сиротьян Е.В. Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // *Дефектоскопия*. 2019. No. 2. С. 43—55.]
25. Osipov S.P., Yadrenkin I.G., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu. Simulation modelling 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. № 8. С. 35—48.]

26. *Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y.* The mathematical model of image, generated by scanning digital radiography system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 168. No. 1. No. article 012042.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/168/1/012042>

27. *Ramachandran G.N., Lakshminarayanan A.V.* Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: application of convolutions instead of Fourier transforms // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1971. V. 68. No. 9. P. 2236—2240.

<https://dx.doi.org/10.1073%2Fpnas.68.9.2236>

28. *Shepp L.A., Logan B.F.* The Fourier reconstruction of a head section // IEEE Transactions on nuclear science. 1974. V. 21. No. 3. P. 21—43.

<https://doi.org/10.1109/TNS.1974.6499235>

29. NIST standard reference database 8 (XGAM) // XCOM: Photon Cross Sections Database. 2008. <https://dx.doi.org/10.18434/T48G6X>

30. *Buratti A., Grozmani N., Voigtmann C., Sartori L.V., Schmitt R.H.* Determination of the optimal imaging parameters in industrial computed tomography for dimensional measurements on monomaterial workpieces // Measurement Science and Technology. 2018. V. 29. No. 11. No. article 115009.

<https://doi.org/10.1088/1361-6501/aae4d6>

31. *Osipov S., Chakhlov S., Shan J., Kairalapov D.* Analysis of the possibility of determining the internal structure of oil and gas pipes by CT method / Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2019. V. 970. P. 187—201. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.187>

32. *Mei K., Ehn S., Oechsner M., Kopp F.K., Pfeiffer D., Fingerle A.A., Pfeiffer F., Combs S.E., Wilkens J.J., Rummeny E.J., Noël P.B.* Dual-layer spectral computed tomography: measuring relative electron density // European Radiology Experimental. 2018. V. 2. No. 1. No. article 20.

<https://doi.org/10.1186/s41747-018-0051-8>

33. *Groenewald A., Groenewald W.A.* A universal phantom suitable for quality assurance on X-ray imaging modalities // Acta Radiologica. 2019. V. 60. No. 11. P. 1523—1531.

<https://doi.org/10.1177%2F0284185119831685>

34. *Emre T., Löffler M., Ehrenfried Z.* Deep learning-based inaccuracy compensation in reconstruction of high resolution XCT data // Scientific Reports (Nature Publisher Group). 2020. V. 10. No. article 7682. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64733-7>

35. *Paziresh M., Kingston A.M., Latham S.J., Fullagar W.K., Myers G.M.* Tomography of atomic number and density of materials using dual-energy imaging and the Alvarez and Macovski attenuation model // Journal of Applied Physics. 2016. V. 119. No. 21. No. article 214901. <https://doi.org/10.1063/1.4950807>

36. *Osipov S., Chakhlov S., Batranin A., Osipov O., Kytmanov J.* Theoretical study of a simplified implementation model of a dual-energy technique for computed tomography // NDT & E International. 2018. V. 98. P. 63—69. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.04.010>

37. *Rizescu C., Beşliu C., Jipa A.* Determination of local density and effective atomic number by the dual-energy computerized tomography method with the ^{192}Ir radioisotope // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2001. V. 465. No. 2—3. P. 584—599. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00181-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00181-4)

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. С.П. Осипов^{1,*}, И.А. Прищепа², С.В. Чахлов^{1,**}, О.С. Осипов³, Е.Ю. Усачев⁴

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30*

²*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия 634003 Томск, пл. Соляная, 2*

³*Medialooks, Россия 236016 Калининград, ул. Александра Невского, 59*

⁴*МИРЭА — Российский технологический университет, Россия 119454 Москва, пр. Вернадского, 78
E-mail: *osip1809@rambler.ru; **ingaprishepa@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.12.2020; после доработки 16.01.2021

Принята к публикации 19.01.2021

Предложены алгоритмы моделирования пространственной структуры пеноматериалов для формирования проекций в рентгеновской компьютерной томографии и последующей реконструкции внутренней структуры образцов. Алгоритмы являются основой численных моделей анализируемых систем применительно к контролю пеноматериалов. Для демонстрации возможностей разработанных алгоритмов были получены синопаммы и результаты реконструкции внутренней структуры образцов из пеноматериалов с вариацией их параметров.

Ключевые слова: пеноматериалы, математическое моделирование, пористость, источники рентгеновского излучения, регистраторы рентгеновского излучения, плотность, эффективный атомный номер, рентгеновская компьютерная томография.

DOI: 10.31857/S0130308221030052

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные и современные вспененные материалы (пеноматериалы) широко используются в различных отраслях науки, техники и строительства [1—6]. К традиционным пеноматериалам (ПМ) относят пенобетон, пенополистирол, пенополиуретан, вспененное стекло, а к современным — вспененные металлы и сплавы. Повышение качества ПМ может быть достигнуто совершенствованием технологий их изготовления. В свою очередь, совершенствование технологий производства ПМ невозможно без применения методов и средств оценки внутренней структуры объектов контроля (ОК) из пеноматериалов [7—9]. К наиболее эффективным способам неразрушающих испытаний ПМ относится рентгеновская компьютерная томография (КТ) [10—14], превратившаяся за последние десятилетия из метода визуализации внутренней структуры ОК в метод измерений различных параметров, например, линейных размеров, плотности, пористости и других. В работах [14, 15] отмечено, что неоднородность пористости материала по объему снижает его прочность. Экспериментальное доказательство возможности измерения с необходимой точностью распределений плотности (пористости) по объему ОК из пеноматериалов с учетом их специфики способом КТ невозможно без наличия дорогостоящего оборудования. На практике в качестве альтернативы экспериментальному подходу используется метод имитационного моделирования, основанный на различных математических моделях формирования ПМ [16—18] с последующим их применением для формирования набора проекций (синопамм) в рентгеновской КТ и дальнейшей реконструкции распределений плотности (пористости) по слоям или по всему объему ОК в целом. Ожидается, что предварительная информация о структуре ПМ позволит существенно упростить алгоритмы численного моделирования пористых структур.

Системы КТ для рассматриваемой задачи состоят из следующих элементов [19, 20]: источника рентгеновского излучения; регистратора рентгеновского излучения; устройства перемещения источника и регистратора излучения относительно ОК; алгоритмов и программ формирования синопамм; алгоритмов и программ оценки распределения плотности (пористости) по слоям ОК или объему ОК в целом; алгоритмов и программ оценки степени однородности ОК по плотности (пористости) по локальным объемам ОК.

Корректный выбор элементов систем рентгеновской компьютерной томографии невозможен без учета ожидаемой внутренней структуры пеноматериалов. Из сказанного выше вытекает необходимость разработки алгоритмов численного моделирования структуры пеноматериалов с целью совершенствования соответствующих алгоритмов формирования и обработки информации.

1. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ

Системы рентгеновской КТ в основном применяются на стадии совершенствования технологий производства пеноматериалов, поэтому в качестве ОК выступают образцы ПМ правильной формы, например, кубы или цилиндры.

1.1. Общее описание процесса образования пор в пеноматериале

Пусть образец ПМ представляет собой куб размером $A \times A \times A$ мм³. Пеноматериал состоит из матрицы и пор. Материал матрицы характеризуется плотностью ρ , г/см³, и эффективным атомным номером Z . Поры содержат воздух или газ. Отношение общего объема пор к объему всего образца называется пористостью η .

Рассмотрим упрощенную модель формирования пор в ПМ. Пусть пеноматериал производится из материалов матрицы и пенообразователя. Естественно предположить, что центры пор должны быть распределены равномерно по объему образца. Очевидно, что масса вещества (сгусток) пенообразователя m , г, приводящего к образованию единичной поры, является случайной величиной. В результате химического или физического воздействия из локального сгустка пенообразователя образуется некоторый объем газа V , пропорциональный массе m . Строго говоря, коэффициент пропорциональности k зависит от сопротивления материала матрицы образованию поры. Целью технологии производства материалов является, как правило, достижение однородности его физико-механических свойств по всему объему. Это относится и к материалам матрицы и, следовательно, к отмеченному выше коэффициенту пропорциональности k . Алгоритм имитационного моделирования структуры пеноматериалов базируется на положениях, описанных выше.

1.2. Алгоритм имитационного моделирования структуры пеноматериалов

Предлагаемый алгоритм состоит из нескольких этапов.

1.2.1. Задание исходных параметров

К исходным параметрам алгоритма относятся:
 размер образца в форме куба — A , мм;
 среднее значение и среднеквадратическое отклонение массы сгустка пенообразователя — M_m, σ_m , г;
 коэффициент пропорциональности в процессе преобразования вещества пенообразователя в газ — k , мм³/г;
 среднее значение пористости материала — η , %;
 плотность материала матрицы — ρ_m , г/см³.

1.2.2. Определение вспомогательных параметров

Вспомогательными параметрами алгоритма являются:

объем кубического образца — V_C , мм³;
 объем пор в образце — V , мм³;
 среднее значение и среднеквадратическое отклонение объема сферической поры — M_V, σ_V , мм³;
 среднее значение и среднеквадратическое отклонение размера сферической поры — M_r, σ_r , мм;
 число пор в образце — N .

Соответствующие формулы имеют вид:

$$V_C = A^3; V = \eta V_C; M_V = k M_m; \sigma_V = k \sigma_m; M_r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} M_V}; \sigma_r = \frac{\sigma_V}{4\pi M_r^2}; N = \text{floor}\left(\frac{V}{M_V}\right), \quad (1)$$

здесь $\text{floor}(x)$ — целая часть числа x .

Далее в качестве необходимых преобразований будут использоваться наименования встроенных функций программы математических вычислений MathCad. Это облегчает процесс записи алгоритма на языке MathCad.

Отметим, что выбор системы MathCad для реализации разрабатываемых численных моделей обусловлен близостью языков математических моделей и MathCad [21].

Для удобства введем еще один вспомогательный параметр B , $B = A/2$.

1.2.3. Розыгрыш параметров совокупности пор

Совокупность пор характеризуется их центрами (x_i, y_i, z_i) и радиусами $r_i, i = 1 \dots N$. Из сказанного выше следует, что случайные величины $x_i, y_i, z_i, i = 1 \dots N$, являются независимыми и распределены равномерно по объему куба. Относительно случайных величин $r_i, i = 1 \dots N$, сделаем предположение об их независимости и принадлежности их к классу случайных величин с усеченным нормальным распределением с параметрами M_r и σ_r . Уточнение класса распределений этих случайных величин может быть осуществлено посредством анализа пористости образцов ПМ.

Введем декартову систему координат $XOYZ$, центр системы координат O расположен в центре куба, а координатные оси параллельны ребрам куба.

Формула для розыгрыша случайных векторов $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{ruinf}(N, -B, B) \\ \mathbf{ruinf}(N, -B, B) \\ \mathbf{ruinf}(N, -B, B) \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где $\mathbf{ruinf}(N, -B, B)$ — MathCad-функция розыгрыша вектора случайных величин, распределенных равномерно на интервале $[-B, B]$.

Выражения для симуляции вектора \mathbf{r} имеет вид:

$$\mathbf{r}^* = \mathbf{rnorm}(N, M_r, \sigma_r), r_i = \max(0, r_i^*), i = 1 \dots N, \tag{3}$$

здесь $\mathbf{rnorm}(N, M_r, \sigma_r)$ — MathCad-функция розыгрыша-вектора случайных величин, распределенных нормально с параметрами M_r, σ_r .

Отметим, что при формировании пористых структур близкорасположенные поры объединяются в одну. Особенно значим этот процесс для высоких уровней пористости. Поры с номерами i и j логично считать близкорасположенными, если расстояние между центрами этих пор Δ_{ij} меньше суммы их радиусов:

$$\Delta_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} < r_i + r_j. \tag{4}$$

Из анализа изображений пеноматериалов [8, 9, 22, 23] можно сделать вывод о значимости одного из сценариев объединения близкорасположенных пор. В этом сценарии объединенная пора состоит из частей исходных сферических пор. Подобного сценария будем придерживаться при разработке моделирования пористых структур.

В двумерной рентгеновской компьютерной томографии внутренняя структура пеноматериала анализируется по послойным изображениям, поэтому из смоделированной совокупности пор в исследуемом образце ПМ необходимо получить описание одного фиксированного слоя.

1.2.4. Описание пористой структуры плоского слоя кубического образца

Кубический образец при испытаниях методом КТ располагается на предметном столе одной из граней, поэтому плоскость слоя параллельна указанной грани и перпендикулярна оси OZ . На вход алгоритма описания пористой структуры плоского слоя кубического образца поступают векторы координат центров пор в кубическом образце $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ и \mathbf{r} и координата z_p слоя. На выходе алгоритма — векторы координат центров сечений пор (окружностей) в слое $\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_p, \mathbf{z}_p$ и \mathbf{r}_p . Искомый алгоритм удобно представить в виде MathCAD-функции **plane**. Эта функция на языке, близком к языку MathCad, описывается следующим выражением:

$$\mathbf{plane}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{R}, Z_p) = \begin{array}{l} ip \leftarrow 0 \\ Nv \leftarrow \text{rows}(\mathbf{X}) \\ \text{for } i \in 1 \dots Nv \\ \quad \text{if } |Z_{ii} - Z_p| < R_i \\ \quad \quad ip \leftarrow ip + 1 \\ \quad \quad \begin{pmatrix} Xp_{ip} \\ Yp_{ip} \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} \\ \quad \quad Rp_{ip} \leftarrow \sqrt{R_i^2 - (Z_i - Z_p)^2} \\ \text{augment}(\mathbf{X}_p, \mathbf{Y}_p, \mathbf{R}_p) \end{array} \tag{5}$$

Приведем некоторые пояснения к выражению (5), касающиеся операторов MathCad:

| — объединение нескольких элементов программы в структурный блок;

← — оператор присваивания в подпрограммах;

rows — количество строк в столбце;

for — оператор цикла;

if — оператор условия;

augment — объединение столбцов (матриц).

Вектора \mathbf{x}_p , \mathbf{y}_p , \mathbf{r}_p являются результатом выполнения функции **plane** с аргументами \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} , \mathbf{r} и z_p :

$$\mathbf{vec} = \mathbf{plane}(x, y, z, r, z_p); \mathbf{x}_p = \mathbf{vec}^{(1)}; \mathbf{y}_p = \mathbf{vec}^{(2)}; \mathbf{r}_p = \mathbf{vec}^{(3)}, \quad (6)$$

здесь $\mathbf{vec}^{(j)}$ — столбец с номером j матрицы \mathbf{vec} . Количество кругов n_p в рассматриваемой плоскости совпадает с количеством строк в матрице \mathbf{vec} :

$$n_p = \text{rows}(\mathbf{vec}). \quad (7)$$

Вектора \mathbf{x}_p , \mathbf{y}_p и \mathbf{r}_p позволяют оценить распределение плотности ρ по сечению кубического образца ПМ.

1.2.5. Распределение плотности ρ по сечению кубического образца пеноматериала

Наиболее полным информативным параметром, характеризующим материал объекта исследований, является плотность. Распределение плотности ρ по сечению кубического образца пеноматериала полностью определяется векторами \mathbf{x}_p , \mathbf{y}_p и \mathbf{r}_p , алгоритм оценки которых приведен в предыдущем разделе.

Функция $\rho(x, y)$ имеет вид:

$$\rho(x, y) = \begin{cases} res \leftarrow 0 \\ res \leftarrow \rho_m \text{ if } (|x| \leq B) \wedge (|y| \leq B) \\ \text{for } i \in 1 \dots n_p \\ res \leftarrow 0 \text{ if } (x - x_{pi})^2 + (y - y_{pi})^2 < r_{pi}^2 \\ res \end{cases} \quad (8)$$

Численные модели имеют дело с дискретными функциями, применительно к рассматриваемому случаю матрицами или изображениями. Так как в рентгеновской компьютерной томографии слой образца просвечивается под разными углами, то необходимо рассматривать круг с центром в точке O с радиусом C , равным или превышающим $\frac{\sqrt{2}}{2}B$, например, $C = 1,5B$. Дискретное распределение плотности ρ_d по сечению образца ПМ описывается выражением:

$$\rho_d = \left\{ \rho_{d\ ij} = \rho(x_i, y_j) \mid x_i = ih, y_j = jh, i = -\frac{M}{2} \dots \frac{M}{2}, j = -\frac{M}{2} \dots \frac{M}{2}, h = \frac{2C}{M} \right\}. \quad (9)$$

Матрица ρ_d может послужить основой вычислительного моделирования процесса формирования синопаммы (совокупности проекций в КТ), с последующей реконструкцией распределения оценки плотности материала $\tilde{\rho}_d$ по сечению образца ПМ. Для визуального сравнения исходного $\tilde{\rho}_d$ и реконструированного $\tilde{\rho}_d$ распределений плотности удобно иметь соответствующие изображения.

Отметим два важных разнонаправленных фактора процесса моделирования пористых структур в ПМ. Первый фактор связан с тем, что в системе MathCad существуют ограничения на объем памяти, используемой идентификаторами. Второй фактор определяется потребительскими ожиданиями к алгоритму моделирования — величина параметра a должна быть существенно меньше размера моделируемых сферических пор. Второй фактор может вступить в противоречие с первым. Впрочем, из этого противоречия существует технологический выход. Если ожидаемые размеры пор малы, то размеры образца ПМ выбираются в соответствии с размерами пор.

1.3. Визуализация исходного распределения плотности материала по сечению кубического образца пеноматериала

Для наглядности матрицу ρ_d можно трансформировать в позитивное полутоновое изображение \mathbf{I} :

$$\mathbf{I} = \left\{ I_{ij} = P_{\max} - \text{floor} \left((P_{\max} - P_{\min}) \frac{\rho_{d\ ij} - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \right) \mid i = 1 \dots M + 1, j = 1 \dots M + 1 \right\}. \quad (10)$$

здесь $\rho_{\min} = \min(\rho_d)$, $\rho_{\max} = \max(\rho_d)$; P_{\min} , P_{\max} — минимальный и максимальный уровни яркости, удобные для восприятия, например, $P_{\min} = 20$, $P_{\max} = 230$.

Отметим, что в позитивном изображении большей яркости соответствует меньший уровень плотности.

В системе MathCad присутствуют команды записи WRITEBMP и считывания READBMP полутоновых изображений в формате *.bmp. Команды записи полутонового изображения \mathbf{I} в файл, например, foam.bmp и считывания файла foam.bmp в полутоновое изображение \mathbf{I} выглядят следующим образом:

$$\text{WRITEBMP}(\text{"foam.bmp"}) := \mathbf{I}, \mathbf{I} := \text{READBMP}(\text{"foam.bmp"}). \quad (11)$$

В формуле (11) символ “:=” является оператором присваивания в MathCad. При преобразовании (1)—(10) и последующих формул в элементы программы в MathCad знак равенства “=” заменяется на оператор присваивания.

2. ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ СИНОГРАММ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ

Для формирования и обработки синограмм воспользуемся алгоритмами, изложенными в работах [24, 25]. Эти алгоритмы базируются на геометрии параллельного пучка излучения, но они тем не менее являются универсальными, так как в многочисленных статьях, например, [26—28] показано, что геометрии веерного и конического пучков при формировании проекций в рентгеновской КТ с математической точки зрения являются эквивалентными параллельному пучку. В [25] подчеркнута, что алгоритм обработки синограмм методом обратного проецирования с фильтрацией является единым для объектов контроля с однородными по эффективному атомному номеру материалами. Будем считать пеноматериалы однородными по эффективному атомному номеру. Особенности же алгоритма моделирования синограмм для образцов из пеноматериалов связаны с многочисленностью сферических пор в объекте и с их возможным слиянием при высоких уровнях пористости. Основная часть алгоритма и программы формирования синограмм описаны в [25], изменения касаются блока построения идеальной синограммы.

2.1. Ввод и первичная обработка исходного изображения сечения образца

На вход блока формирования идеальной синограммы поступает файл изображения сечения образца в формате *.bmp. Система MathCad предоставляет возможность работы с текстовыми файлами, поэтому обмениваться между разными программами можно только текстовой переменной с именем файла. Например, запись $file := \text{"foam.bmp"}$ содержит информацию об имени файла с изображением. В имени файла может содержаться служебная информация, например, номер слоя (сечения), дата и т.п. Ввод необходимого файла в матрицу \mathbf{I} осуществляется по команде $\mathbf{I} := \text{READBMP}(file)$.

Отметим, что файл с изображением сечения может быть получен в ходе вычислительного эксперимента по алгоритму, описанному выше, или экспериментально. Обязательным требованием является высокое пространственное разрешение вводимого изображения. Размер пикселя должен быть намного меньше среднего размера обособленных сферических пор.

2.1.1. Оценка распределения плотности

На первом этапе яркость естественным образом трансформируется в распределение плотности по сечению. В нашем случае исходное изображение можно с определенной долей условности

считать бинарным: пространство поры — одна яркость, а материал матрицы — другая яркость. Преобразование изображения **I** в распределение плотности по сечению образца описывается простейшим выражением:

$$\rho_{ij} := \begin{cases} res \leftarrow \rho_m & \text{if } I_{ij} \neq P_{\max} \\ res \leftarrow 0 & \text{if } I_{ij} = P_{\max} \\ res \end{cases} \quad (12)$$

При наличии шумов условия равенства/неравенства могут быть изменены на условия принадлежности/непринадлежности интервалу яркостей.

В процессе формирования проекций необходимо интегрировать плотность по соответствующим лучам, а лучи не всегда проходят через узлы сетки (x_i, y_j) , $i = 1 \dots M$, $j = 1 \dots M$. Поэтому для оценки плотности в любой точке с координатами (x, y) необходима функция двумерной интерполяции. Необходимость в высокой производительности алгоритма обуславливает выбор в пользу билинейной интерполяции. В работе [29] отмечено, что билинейная интерполяция наиболее часто используется для улучшения качества изображений при цифровом масштабировании или повороте. Именно эти два преобразования характерны для цифровой радиографии и рентгеновской компьютерной томографии.

Приведем реализацию алгоритма билинейной интерполяции в MathCad с учетом особенностей рассматриваемой задачи. Подпрограмма билинейной интерполяции $\rho_{\text{int}}(x, y)$ может быть записана в виде:

$$\rho_{\text{int}}(x, y) := \begin{cases} \begin{pmatrix} i1 \\ j1 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} \text{floor}\left(\frac{x}{h}\right) \\ \text{floor}\left(\frac{y}{h}\right) \end{bmatrix} \\ res \leftarrow 0 \\ \text{if} \left(-\frac{M}{2} < i1 < \frac{M}{2} \right) \wedge \left(-\frac{M}{2} < j1 < \frac{M}{2} \right) \\ \begin{pmatrix} i2 \\ j2 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} i1 + 1 \\ j1 + 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} F11 & F12 \\ F21 & F22 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} I_{i1,j1} & I_{i1,j2} \\ I_{i2,j1} & I_{i2,j2} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \Delta X1 & \Delta Y1 \\ \Delta X2 & \Delta Y2 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} x - X_{i1} & y - Y_{j1} \\ X_{i2} - x & Y_{j2} - y \end{pmatrix} \\ res \leftarrow \frac{(F11 \cdot \Delta X2 + F21 \cdot \Delta X1) \cdot \Delta Y2 + (F12 \cdot \Delta X2 + F22 \cdot \Delta X1) \cdot \Delta Y1}{h^2} \\ res \end{cases} \quad (13)$$

Ниже продемонстрируем применение билинейной интерполяции для увеличения и поворота изображений сечений образцов ПМ.

2.1.2. Цифровое масштабирование и поворот изображений сечений

Поясним необходимость цифрового масштабирования изображений сечений. Напомним, что размеры пор M_p существенно меньше размера оптической апертуры h , но этого недостаточно. Аналитическое вычисление толщины объекта в сечении вдоль луча не вызывает особых затруднений для крайне ограниченных форм сечений фрагментов, таких как круг или квадрат. Пористые структуры отличаются сложностью форм при объединении двух и более пор, значительным количеством

пересечений лучом пор. Вычислить интеграл плотности вдоль луча в такой ситуации затруднительно даже численно.

Для обеспечения высокой производительности оценки толщин объекта при поворотах в длинах свободного пробега без особой потери качества в работах [24, 25] предложено виртуально увеличить масштаб изображения сечения.

Параметр k характеризует степень увеличения масштаба изображения.

Увеличенное изображение ρ_H формируется в соответствии с следующей формулой:

$$\rho_H = \left\{ \rho_{H i_x j_y} = \rho_{int}(x_{i_x}, y_{j_y}) \mid x_{i_x} = i_x h_k, y_{j_y} = j_y h_k, i_x = -\frac{kM}{2} \dots \frac{kM}{2}, j_y = -\frac{kM}{2} \dots \frac{kM}{2} \right\}, \quad (14)$$

здесь $h_k = \frac{2C}{kM} = \frac{h}{k}$ — шаг новой сетки.

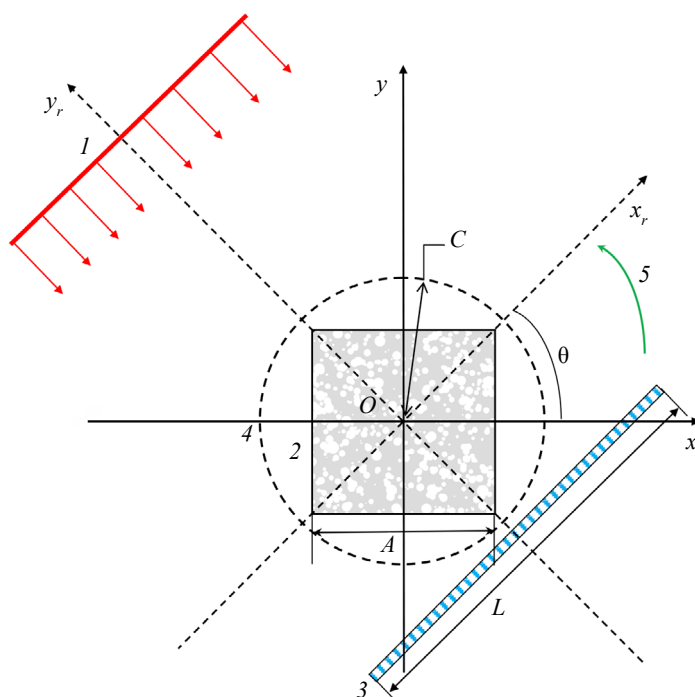


Рис. 1. Схема сканирования в компьютерной томографии в геометрии параллельного пучка: 1 — пучок рентгеновского излучения; 2 — образец пеноматериала; 3 — линейный детектор; 4 — окружность, описывающая сечение образца; 5 — направление вращения образца.

На рис. 1 приведена схема сканирования в КТ в геометрии параллельного пучка.

Значение плотности материала ОК в точке с координатами (x, y) с учетом поворота объекта вокруг точки O на угол θ оценивается с помощью MathCAD-функции rotation. Аргументами функции rotation являются координаты точки (x, y) а также параметры si и co : $si = \sin(\theta)$, $co = \cos(\theta)$. Параметры si и co вычисляются заранее, устранение многократного вычисления синусов и косинусов существенно повышает производительность процесса вычислений. Оценка плотности материала осуществляется по плотности материала в узловой точке, ближайшей к координатам точки (x, y) , переместившейся в результате поворота образца ПМ на угол θ . Результатом выполнения функции rotation является искомая оценка плотности материала. Текст функции rotation отличается исключительной простотой и выглядит следующим образом:

$$\text{rotation}(x, y, si, co) := \left(\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} x_r \\ y_r \end{array} \right) \leftarrow \left(\begin{array}{l} x \cdot co - y \cdot si \\ x \cdot si + y \cdot co \end{array} \right) \\ res \leftarrow 0 \text{ if } (|x_r| > C) \vee (|y_r| > C) \\ \left(\begin{array}{l} i_n \\ j_n \end{array} \right) \leftarrow \left(\begin{array}{l} \text{floor} \left(\frac{x_r}{h_k} + 0.5 \right) \\ \text{floor} \left(\frac{y_r}{h_k} + 0.5 \right) \end{array} \right) \\ res \leftarrow 0 \\ res \leftarrow \rho_{H i_n j_n} \text{ if } \left(-\frac{kM}{2} < i_n < \frac{kM}{2} \right) \wedge \left(-\frac{kM}{2} < j_n < \frac{kM}{2} \right) \\ res \end{array} \right). \quad (15)$$

Точность оценки плотности определяется величиной h_k .

2.2. Моделирование идеальной синограммы сечения образца пеноматериала

Идеальная синограмма \mathbf{S} представляет собой совокупность идеальных проекций $\mathbf{Pr}(\theta_k)$, $k=1 \dots m_\theta$, здесь m_θ — количество проекций. Количество проекций связано с шагом по углу $\Delta\theta$ соотношением $m_\theta = 2\pi/\Delta\theta$. Под идеальной проекцией \mathbf{Pr} для угла θ_k здесь понимается вектор значений массовых толщин вдоль лучей, соответствующим центрам детекторов линейки x_{L_i} , $i = 1 \dots n+1$, с поперечным размером апертуры b .

$$\mathbf{S} = \{ \mathbf{Pr}(\theta_k) \mid k = 1 \dots m_\theta \}, \mathbf{Pr}(\theta_k) = \{ p(x_{L_i}, \theta_k) \mid i = 1 \dots n+1 \}. \quad (16)$$

Для набора углов ($\theta_k, k = 1 \dots m_\theta$) вычисляются наборы значений синусов и косинусов $si_k = \sin(\theta_k)$, $co_k = \cos(\theta_k)$. Формула для вычисления элементов матрицы \mathbf{S} имеет вид:

$$S_{ik} := h_k \sum_{l=-\frac{kM}{2}}^{\frac{kM}{2}} \text{rotation}(x_{L_l}, y_l, si_k, co_k). \quad (17)$$

Совокупность формул (1)—(17) позволяет построить идеальную синограмму кубического образца пеноматериала, которая может быть использована в качестве исходной модели структуры объекта контроля для формирования и обработки информации в КТ [25].

3. ПРИМЕР ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИНОГРАММЫ ДЛЯ ОБРАЗЦА ПЕНОМАТЕРИАЛА

В качестве матрицы пеноматериала рассмотрим алюминий с плотностью $\rho_m = 2,7 \text{ г/см}^3$. Кубический образец ПМ характеризуют следующие параметры: длина ребра куба $A = 10 \text{ мм}$; пористость $\eta = 0,5$; среднее значение и среднеквадратическое отклонение массы сгустка пенообразователя $M_m = 0,1 \text{ мг}$, $\sigma_m = 0,03 \text{ мг}$; коэффициент пропорциональности в процессе преобразования вещества пенообразователя в газ $k = 30 \text{ мм}^3/\text{г}$.

Характеристики оптического изображения образца: размер изображения $15 \times 15 \text{ мм}^2$; размер пикселя 15 мкм ; коэффициент масштабирования 5; уровень «серого», соответствующий порам, 230, уровень «серого», соответствующий материалу матрицы ПМ, 55.

При моделировании структуры образца пеноматериала рассматривался центральный слой $z = 0$. В центральном слое оказалось 248 пор. Среднее значение радиуса поры в вычислительном эксперименте близко к $0,3 \text{ мм}$.

Параметры системы КТ: максимальная энергия в спектре $E_{\max} = 150 \text{ кэВ}$; материал сцинтилляционного детектора CdWO_4 ; толщина сцинтиллятора $0,3 \text{ мм}$; эффективный размер пикселя

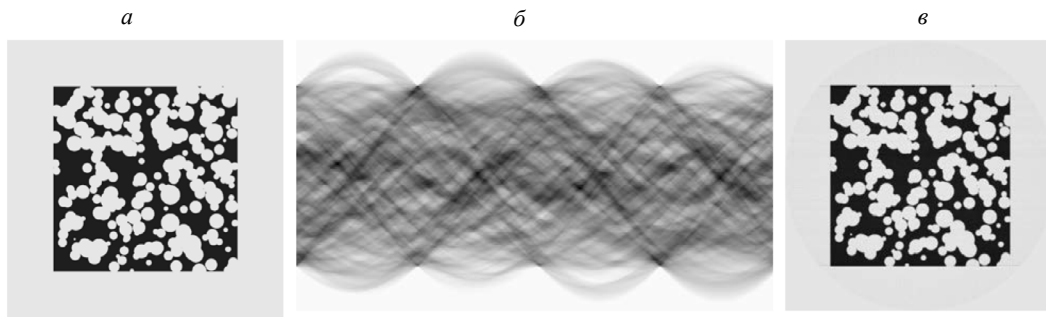


Рис. 2. Кубический образец пеноматериала из алюминия, средний размер пор 0,3 мм:
а — изображение центрального слоя образца; *б* — синограмма; *в* — реконструкция.

37,5 мкм; число детекторов в линейке 400. Метод реконструкции — обратная проекция с фильтрацией Шеппа—Логана [30].

На рис. 2*а* приведено полутоновое изображение полученного виртуального слоя образца ПМ. Данное изображение поступало на блок формирования синограмм алгоритма [25] с учетом описанной выше модификации информации о структуре испытуемого объекта. Для иллюстрации на рис. 2*б* показана модельная синограмма. Реконструкция сечения центрального слоя представлена на рис. 2*в*.

Сравнение изображений на рис. 2*а* и *б* подтверждает эффективность применения КТ для оценки структуры пеноматериалов.

Для выяснения значимого ухудшения качества оценки внутренней структуры с уменьшением размеров пор методом КТ размер пор был уменьшен в два раза, до 0,15 мм. Размеры пикселей изображения сечения и пикселя реконструированного изображения уменьшены в полтора раза. Количество проекций увеличено также в полтора раза. В исследуемом слое количество пор равно 1034. Увеличение числа пор и пикселей в изображениях привело к возрастанию времени расчетов в 9 раз. Эффективный размер пикселя в реконструированном изображении равен 25 мкм.

На рис. 3 приведены изображения центрального слоя, синограммы и реконструкции для рассмотренного примера. Так как размеры пор существенно меньше, чем в примере для рис. 2, то для возможности детального сравнения исходного и реконструированного изображений размеры их увеличены.

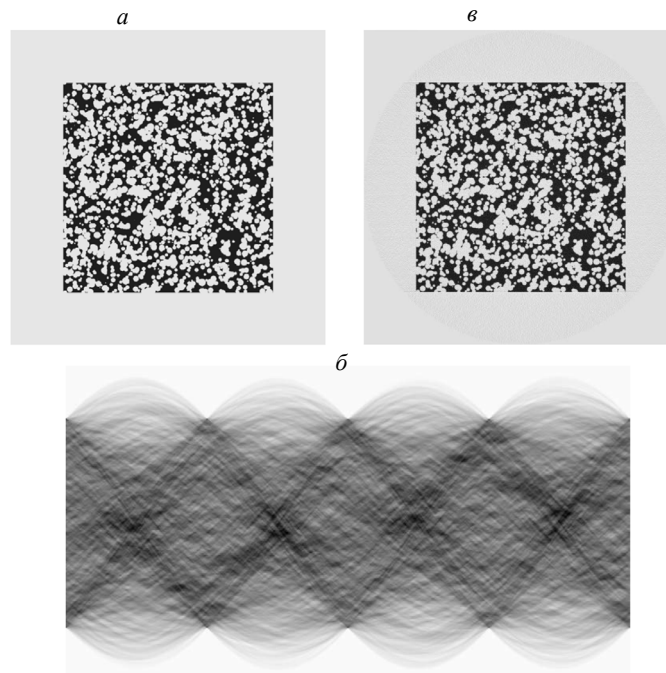


Рис. 3. Кубический образец пеноматериала из алюминия, средний размер пор 0,15 мм:
а — изображение центрального слоя образца; *б* — синограмма; *в* — реконструкция.

В результате анализа характерных фрагментов (скоплений пор) исходного и реконструированного изображений сечений испытуемых образцов ПМ на рис. 2 и 3 можно сделать вывод о достаточно высоком качестве имитационного моделирования структуры образца пеноматериала и реконструкции соответствующих синограмм. Это делает возможным использовать предлагаемый вариант совершенствования алгоритмов из [25] за счет блоков моделирования структуры пеноматериалов и соответствующих изменений в алгоритме формирования синограмм.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве результатов натурального эксперимента для подтверждения приведенной выше модификации алгоритма численного моделирования формирования и обработки синограмм при контроле пеноматериалов могут быть использованы результаты исследования методом рентгеновской КТ высокого разрешения образцов ПМ, бинарные оптические изображения срезов образцов ПМ. Эти изображения логично считать экспериментальными. Они поступают на вход алгоритма формирования синограмм и являются, по сути, оригиналами. Процесс реконструкции приводит к оценке оригинала. Степень соответствия экспериментального оригинала и его оценки характеризует качество обобщенного алгоритма численного моделирования синограмм и реконструкции изображений сечений объекта контроля. Что же касается блока моделирования пористой структуры пеноматериалов, то он основывается на предварительном анализе указанных выше экспериментальных оригиналов сечений образцов ПМ при малых уровнях пористости. Полученные параметры процесса порообразования используются для моделирования пористых структур с высокими уровнями пористости.

В качестве примера оригинала рассмотрим изображение сечения образца ПМ [31] размером 3 мм, средние размеры пор около 40 мкм, эффективный размер пикселя около 2 мкм. Из расчетов оптимальное значение максимальной энергии рентгеновского излучения равно 30 кэВ. Для этих условий, 1080 проекций и коэффициента масштабирования $k = 3$ было проведено численное моделирование синограмм и реконструкция методом обратной проекции с фильтрацией Шеппа—Логана [30]. На рис. 4 приведены исходные результаты и результаты вычислительного эксперимента.

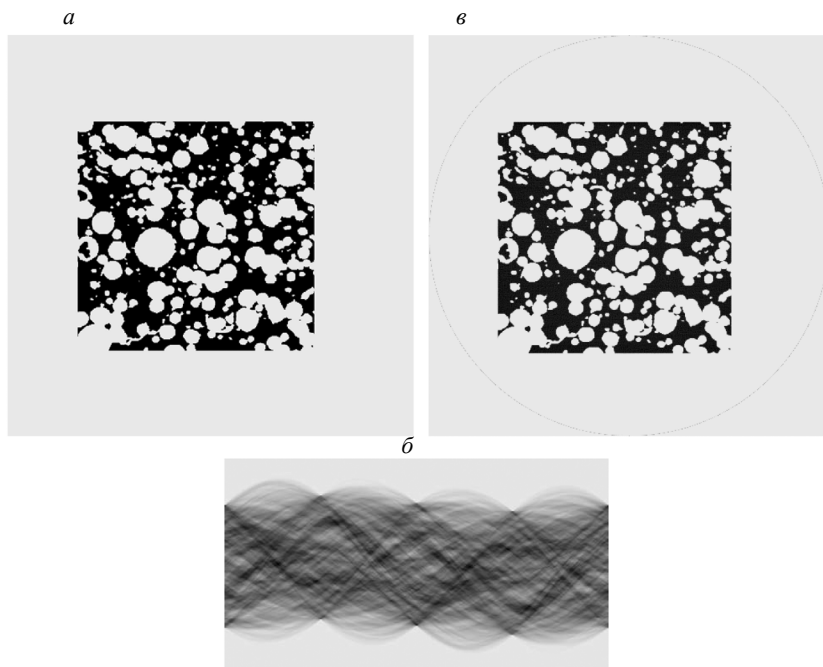


Рис. 4. Экспериментальный оригинал [31], имитационный образ и оценка оригинала: *a* — сечения образца (оригинал); *б* — синограмма (образ); *в* — оценка оригинала (реконструкция).

Сравнение экспериментального оригинала и его имитационной оценки, полученной в результате вычислительного эксперимента, подтверждает эффективность обобщенного алгоритма численного моделирования формирования и обработки синограмм применительно к исследованию ПМ методом рентгеновской КТ.

В работе [31] отмечено, что существуют и другие формы пористых структур кроме отмеченных выше. Среди них можно выделить структуры из пор с оболочкой из материала матрицы, причем поры могут быть правильной (недеформированной) и неправильной (деформированной) формы. В обоих случаях описанные поры характеризуются толщиной оболочки. Еще одним признаком классификации подобных ПМ является материал заполнения пространства между единичными оболочечными порами — воздух (газ) или материал матрицы. Численное моделирование подобных структур отличается повышенной вычислительной сложностью. Следует также отметить, что для некоторых видов ПМ материал между пор не является однородным по всему объекту, так как содержит микро (нано) поры. Во всех подобных случаях полезно использовать алгоритм формирования и обработки синограмм, описанный выше.

В статье [24] подчеркнута, что совершенствование алгоритмов численного моделирования формирования и обработки информации за счет учета внутренней структуры объектов контроля в рентгеновской компьютерной томографии представляет особый интерес в связи с развитием аддитивных технологий производства технических изделий [32] из разнообразных материалов, в том числе и пеноматериалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к совершенствованию алгоритмов численного моделирования формирования и обработки информации в рентгеновской компьютерной томографии пеноматериалов за счет учета их внутренней структуры. Разработан алгоритм имитационного моделирования структуры пеноматериалов с высокой пористостью с возможностью оценки распределение плотности по сечению испытуемого кубического образца. Рассмотрены особенности формирования синограмм при испытаниях пеноматериалов, которые сводятся к вводу и первичной обработке экспериментального или модельного изображения сечения образца на основе двумерной интерполяции исходных данных, цифрового масштабирования и поворота изображений сечений. Для демонстрации возможностей разработанных алгоритмов были получены синограммы и результаты реконструкции внутренней структуры образцов из пеноматериалов с вариацией их параметров. Обсуждены возможные направления исследований, касающихся моделирования структур пеноматериалов. Усовершенствованный обобщенный алгоритм численного моделирования, описанный в работе, может быть использован на стадии выбора регулируемых параметров существующих или проектируемых систем рентгеновской компьютерной томографии применительно к контролю структуры пеноматериалов с целью совершенствования технологии их изготовления. Дополнительным направлением применения усовершенствованных алгоритмов и программ является их использование в процессах обучения бакалавров, магистрантов и аспирантов по дисциплинам, связанным с метрологией, материаловедением и неразрушающим контролем, в качестве виртуального симулятора рентгеновской компьютерной томографии для испытаний пеноматериалов.

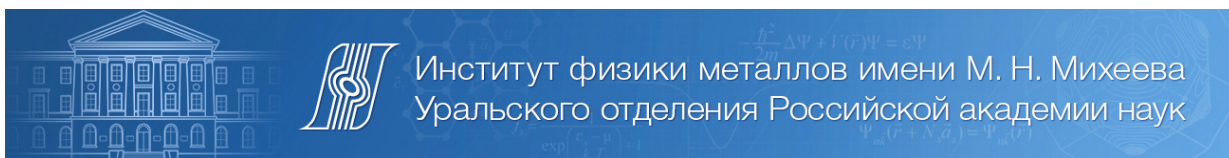
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Farhadi S., Kafili D., Ziadloo S.* Review of aluminum foam applications in architecture // *European Journal of Engineering Science and Technology*. 2020. V. 3. No. 1. P. 62—70. <https://doi.org/10.33422/ejest.v3i1.162>
2. *Kausar A.* Advances in polymer-anchored carbon nanotube foam: a review // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2019. V. 58. No. 18. P. 1965—1978. <https://doi.org/10.1080/25740881.2019.1599945>
3. *Suvorova O.V., Makarov D.V.* Foam glass and foam materials based on ash-slag wastes from thermal power plants // *Glass and Ceramics*. 2019. V. 76. No. 5—6. P. 188—193. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00162-x>
4. *Chen K., Guo L., Wang H.* A review on thermal application of metal foam // *Science China Technological Sciences*. 2020. P. 1—22. <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1637-3>
5. *Raj A., Sathyan D., Mini K.M.* Physical and functional characteristics of foam concrete: A review // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 221. P. 787—799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>
6. *Fu Y., Wang X., Wang L., Li Y.* Foam concrete: A state of the art and state of the practice review // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. V. 2020. Article ID 6153602. 25 p. <https://doi.org/10.1155/2020/6153602>
7. *Duarte I., Fiedler T., Krstulović-Opara L., Vesenjak M.* Brief review on experimental and computational techniques for characterization of cellular metals // *Metals*. 2020. V. 10. No. 6. No. article 726. <https://doi.org/10.3390/met10060726>

8. *Spowage A.C., Shacklock A.P., Malcolm A.A., May S.L., Tong L., Kennedy A.R.* Development of characterisation methodologies for macroporous materials // *Journal of porous materials*. 2006. V. 13. No. 3—4. P. 431—438. <https://doi.org/10.1007/s10934-006-8042-1>
9. *Peng R., Yang Y., Ju Y., Mao L., Yang Y.* Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images // *Chinese Science Bulletin*. 2011. V. 56. No. 31. P. 3346—3357. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4683-9>
10. *Umbach C., Middendorf B.* 3D structural analysis of construction materials using high-resolution computed tomography // *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 15. P. 356—363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.094>
11. *Abd Elrahman M., El Madawy M.E., Chung S.Y., Majer S., Youssf O., Sikora P.* An investigation of the mechanical and physical characteristics of cement paste incorporating different air entraining agents using X-ray micro-computed tomography // *Crystals*. 2020. V. 10. No. 1. No. article 23. <https://doi.org/10.3390/cryst10010023>
12. *Miedzińska D., Niezgodna T., Gieleta R.* Numerical and experimental aluminum foam microstructure testing with the use of computed tomography // *Computational Materials Science*. 2012. V. 64. P. 90—95. <https://doi.org/10.1016/j.compmatsci.2012.02.021>
13. *Elmoutaouakkil A., Fuchs G., Bergounhon P., Peres R., Peyrin A.* Three-dimensional quantitative analysis of polymer foams from synchrotron radiation x-ray microtomography // *Journal of physics D: applied physics*. 2003. V. 36. No. 10A. P. A37—43. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/10A/308>
14. *Lin C.L., Videla A.R., Yu Q., Miller J.D.* Characterization and analysis of porous, brittle solid structures by X-ray micro computed tomography // *JOM*. 2010. V. 62. No. 12. P. 86—89. <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0188-2>
15. *Utsunomiya H., Matsumoto R.* Deformation processes of porous metals and metallic foams // *Procedia Materials Science*. 2014. V. 4. P. 245—249. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.614>
16. *Yuasa N., Kasai Y., Matsui I.* Inhomogeneous distribution of compressive strength from surface layer to interior of concrete in structures // *Special Publication*. 2000. V. 192. P. 269—282.
17. *Wei S., Yiqiang C., Yunsheng Z., Jones M.R.* Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete // *Construction and building materials*. 2013. V. 47. P. 1278—1291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.027>
18. *Qian R., Liu G., Liu Z., She W., Qiao H., Zhang Y.* Investigations on three-dimensional pore-structure in cementitious materials using metal centrifugation porosimetry and simulation // *Materials Letters*. 2021. V. 282. No. article 128684. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128684>
19. *Wei Y., Olsen D.H., Miller C.M., Wagner K.B., Keyhani A., Thadhani N., Zhou M.* Computational design of three-dimensional multi-constituent material microstructure sets with prescribed statistical constituent and geometric attributes // *Multiscale Science and Engineering*. 2020. V. 2. P. 7—19. <https://doi.org/10.1007/s42493-020-00032-7>
20. *Hsieh J.* Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. 3rd rev. ed. SPIE Press, Bellingham. USA. 2015.
21. *Sarantites D.G., Sobotka L.G.* Computational templates for introductory nuclear science using Mathcad // *American Journal of Physics*. 2013. V. 81. No. 1. P. 44—49. <https://doi.org/10.1119/1.4764079>
22. *Croom B.P., Jin H., Mills B., Carroll J., Long K., Brown J., Li X.* Damage mechanisms in elastomeric foam composites: Multiscale X-ray computed tomography and finite element analyses // *Composites Science and Technology*. 2019. V. 169. P. 195—202. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.025>
23. *Jabarkhyl S., Barigou M., Zhu S., Rayment P., Lloyd D.M., Rossetti D.* Foams generated from viscous non-Newtonian shear-thinning liquids in a continuous multi rotor-stator device // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. V. 59. No. article 102231. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102231>
24. *Osipov S.P., Yadrenkin I.G., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu.* Simulation modelling 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., Усачев Е.Ю.* Имитационное моделирование в цифровой радиографии с учетом пространственных форм объектов контроля // *Дефектоскопия*. 2020. No. 8. С. 35—48.]
25. *Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю., Манушкин А.А.* Вычислительная модель рентгеновской компьютерной томографии с функцией оценки плотности // *Дефектоскопия*. 2021. № 3. С. 37—52.
26. *Feldkamp L.A., Davis L.C., Kress J.W.* Practical cone-beam algorithm // *Journal of the Optical Society of America A, Optics and image science*. 1984. V. 1. No. 6. P. 612—619.
27. *Hiriyannaiah H.P.* X-ray computed tomography for medical imaging // *IEEE signal Processing magazine*. 1997. V. 14. No. 2. P. 42—59. <https://doi.org/10.1109/79.581370>
28. *Kachelrieß M., Knaup M., Kalender W.A.* Extended parallel backprojection for standard three-dimensional and phase-correlated four-dimensional axial and spiral cone-beam CT with arbitrary pitch, arbitrary cone-angle, and 100% dose usage // *Medical Physics*. 2004. V. 31. No. 6. P. 1623—1641. <https://doi.org/10.1118/1.1755569>

29. *Gribbon K.T., Bailey D.G.* A novel approach to real-time bilinear interpolation / Proceedings. DELTA 2004. Second IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications // IEEE. 2004. P. 126—131. <https://doi.org/10.1109/DELTA.2004.10055>
30. *Shepp L.A., Logan B.F.* The Fourier reconstruction of a head section // IEEE Transactions on nuclear science. 1974. V. 21. No. 3. P. 21—43. <https://doi.org/10.1109/TNS.1974.6499235>
31. *Lehmhus D., Vesenjak M., de Schampheleire S., Fiedler T.* From stochastic foam to designed structure: Balancing cost and performance of cellular metals // Materials. 2017. V. 10. No. 8. No. article 922. <http://dx.doi.org/10.3390/ma10080922>
32. *Du Plessis A., Yadroitsava I., Yadroitsev I.* Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights // Materials & Design. 2020. V. 187. No article 108385. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108385>
-

**XXXII Уральская конференция с международным участием
«ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
(ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)»
30-31 марта 2021 г.**

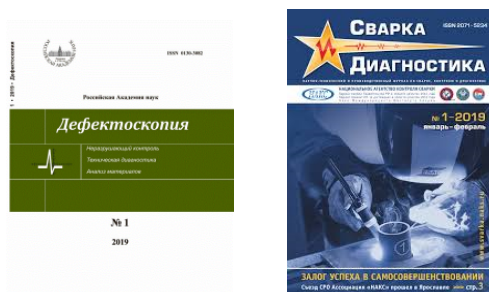


Партнеры



**Уральский
федеральный
университет**
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Информационная поддержка: журналы «Дефектоскопия/Russian Journal of Nondestructive Testing» и «Сварка и диагностика».



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас принять участие в XXXII Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», которая будет проходить 30-31 марта 2021 г. на базе Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18). Формат проведения — **on line**.

РАЗДЕЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

1. Физические основы неразрушающего контроля и диагностики.
2. Методы и средства измерения физических полей. Новые средства и системы контроля.
3. Контроль труб и диагностика трубопроводов.
4. Контроль сварных соединений.
5. Методы и средства контроля напряженно-деформированного состояния изделий и объектов.
6. Опыт практического применения физических методов и средств контроля.
7. Стандартизация и метрологическое обеспечение средств НК.
8. Квалификация и подготовка персонала в области НК.

Участие в конференции — бесплатное.

Порядок проведения on-line выступлений будет сообщен дополнительно.

ЯЗЫКИ КОНФЕРЕНЦИИ

Русский, английский.

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ОРГКОМИТЕТА

Сясько В.А., президент РОНКТД, профессор, д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет, г. С.-Петербург

Смородинский Я.Г., профессор, д.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Крёнинг Х.-М.В., проф., Саарский университет, Саарбрюкен, Германия, проф. университета Сан-Пауло, Бразилия

Сташков А.Н. (ученый секретарь конференции), к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА

Вайнштейн И.А., д.ф.-м.н., УрФУ им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Василенко О.Н., к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Клюев С.В., к.э.н., МНПО «Спектр», г. Москва

Костин В.Н., д.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Михайлов А.В., к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Поволоцкая А.М., к.т.н., Имаш УрО РАН, г. Екатеринбург

Путилова Е.А., к.т.н., Имаш УрО РАН, г. Екатеринбург

Ринкевич А.Б., член-корр. РАН, ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Смирнов С.В., д.т.н., Имаш УрО РАН, г. Екатеринбург

КОНТАКТЫ

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, www.imp.uran.ru

Тел. (343) 378-36-18

Факс (343) 374-52-44 (с пометкой «Оргкомитет ФМНК-32 Сташкову Алексею Николаевичу»)

e-mail: stashkov@imp.uran.ru

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

Регистрация и прием тезисов – до **12 марта 2021 г.**

Заявка на участие и тезисы принимаются по e-mail: stashkov@imp.uran.ru. При отправке тезисов просим указывать дополнительные контактные данные (телефон, факс).

При формировании программы Оргкомитетом конференции будет проводиться отбор докладов. Часть отобранных Оргкомитетом докладов будет рекомендована для публикации в журналах «Дефектоскопия», «Сварка и диагностика», «В мире НК» в виде статей. Требования к статьям указаны на сайте журнала «Дефектоскопия» <http://defectoskopiya.ru/pages/view/submitting>.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕЗИСОВ

В тексте тезисов должны быть указаны: цель работы, суть обсуждаемой проблемы, полученные результаты и выводы. Объем — до 2-х страниц формата А4, кегль 12. В тексте тезисов указываются название, ФИО авторов (ФИО докладчика указать полностью и подчеркнуть), название организации, город, e-mail. Оформление — в соответствии с шаблоном: <http://defectoskopiya.ru/public/docs/XXXIIUralConferenceTemplate.docx>.

ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДОКЛАДА

- устный on-line доклад;
- стендовый on-line доклад (презентация объемом до 10 слайдов в формате PowerPoint).

Презентации устных и стендовых докладов будут размещены на сайте журнала «Дефектоскопия» <http://defectoskopiya.ru/index>.

Правила отправки статей в журнал «Дефектоскопия»

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

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

Для корректной работы рекомендуется использовать следующие браузеры:

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

Редколлегия