



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 6

2024



НАУКА
— 1727 —

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 6
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

- Л.Н. Степанова, В.А. Батаев, В.В. Чернова, С.В. Шейфер.** Влияние методов формования на дефекты в образцах из углепластика АСМ при статическом нагружении 3

Электрические методы

- Цянь Чжан, Хонг Мо, Руксуэ Ли, Чэньхуа Лян, Цзюньхуа Луо.** Метод неразрушающего контроля для электроемкостной томографии на основе восстановления изображений сигналов от вращающихся электродов 15

Радиационные методы

- С.А. Золотарев, А.Т. Таруат.** Параллельная реконструкция изображений методом максимально правдоподобия с использованием графического процессора и библиотеки OpenGL 28

Электромагнитные методы

- М.И. Горлов, В.А. Сергеев.** Диагностика полупроводниковых изделий по параметрам низкочастотного шума 39

Тепловые методы

- В.Г. Дегтярь, В.В. Гусев, С.Т. Калашников, Г.Ф. Костин, А.И. Новиков, В.И. Хлыбов.** Изменение свойств материалов и тепловлажностных режимов при длительных сроках эксплуатации изделий и диагностика зависимостей теплофизических характеристик от темпов нагрева 46

По материалам XXXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

- М.В. Сясько, И.П. Соловьев, П.В. Соломенчук.** Технологии автоматической градуировки и проверки двухпараметровых вихретоковых толщиномеров диэлектрических покрытий 58

- С.Г. Сандомирский.** Моделирование безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала и использование его результата для магнитного структурного анализа 63

- А.В. Батуева, О.Н. Василенко, В.Н. Костин.** Оптимизация мест расположения датчиков поля и потока в приставных преобразователях магнитных структуроскопов 69

- О.А. Колганов, К.И. Доронин, А.С. Голев.** Оптимизация параметров первичного преобразователя прибора динамического инструментального индентирования с дифференциальной катушкой 74

- Информация 79

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ФОРМОВАНИЯ НА ДЕФЕКТЫ В ОБРАЗЦАХ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА АСМ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2024 г. Л.Н. Степанова^{1,*}, В.А. Батаев², В.В. Чернова³, С.В. Шейфер¹

¹ ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина»,
Россия 630051 Новосибирск, ул. Ползунова, 21

² Новосибирский государственный технический университет,
Россия 630064 Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

³ Сибирский государственный университет путей сообщения,
Россия 630049 Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191
E-mail: *akustika2063@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.01.2024; после доработки 25.04.2024

Принята к публикации 24.05.2024

Проведены статические испытания образцов из углепластика АСМ, изготовленных методами автоклавного и вакуумного формования. Для контроля дефектов применялись акустические методы (акустико-эмиссионный и ультразвуковой), тензометрия и выполнялся микроанализ шлифов. Локация сигналов акустической эмиссии в области концентратора напряжений позволила определить, что при автоклавном формовании количество дефектов в десять раз меньше, чем при вакуумном. Ультразвуковой и акустико-эмиссионный методы, тензометрия и микроанализ позволили определять структуру углепластика АСМ, координаты дефектов и их тип. При контроле ненагруженных образцов, выполненных вакуумным формованием, обнаружены производственные дефекты, которые при статическом растяжении увеличивались в размерах и приводили к зарождению новых разрушений. В образцах, изготовленных методом автоклавного формования, производственные дефекты не обнаружены. Микроанализ образцов, произведенных вакуумным методом, выявил дефекты, связанные с разрушением волокон, растрескиванием матрицы, расслоением. Испытания образцов, выполненных автоклавным формованием, показали, что дефекты в них практически отсутствуют.

Ключевые слова: углепластик, вакуумное и автоклавное формование, акустическая эмиссия, ультразвуковой контроль, тензометрия, микроанализ структуры углепластика.

INFLUENCE OF MOLDING METHODS ON DEFECTS IN CARBON FIBER SAMPLES AFM UNDER STATIC LOADING

© 2024 L.N. Stepanova^{1,*}, V.A. Bataev², V.V. Chernova³, S.V. Sheifer¹

¹ FAI Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin,
Russia 630051 Novosibirsk, Polzunova st., 21

² The Novosibirsk State Technical University,
Russia 630064 Novosibirsk, K. Marx avenue, 20

³ The Siberian Transport University,
Russia 630049 Novosibirsk, D. Kovalchuk street, 191
E-mail: *akustika2063@yandex.ru

Samples from domestic ACM carbon fiber made by autoclave and vacuum forming under static loading were studied. To control defects, acoustic methods (acoustic emission, ultrasonic), strain metering were used and microanalysis of their thin sections was carried out. The location of acoustic emission signals in the region of the stress concentrator made it possible to determine that in autoclave molding their number is ten times less than in vacuum. The ultrasonic method and acoustic emission made it possible to determine the structure of carbon fiber, the coordinates of defects and their type. During the control of unloaded samples made by vacuum molding, manufacturing defects were found that, when stretched statically, increased in size and led to the initiation of new failures. In autoclave-formed samples, manufacturing defects were not found. Microanalysis of vacuum samples revealed defects associated with fiber failure, matrix cracking, and delamination. Autoclave tests showed that the number of defects and their dimensions were significantly reduced.

Keywords: carbon fiber, vacuum and autoclave molding, acoustic emission, ultrasonic testing, tensometry, microanalysis of carbon fiber structure.

DOI: 10.31857/S0130308224060063

ВВЕДЕНИЕ

Для авиационной промышленности в настоящее время разрабатывается большое количество новых марок углепластиков. Механические свойства композиционных материалов (КМ) под влиянием нагрузок (статических, циклических, ударных) и климатических факторов (тем-

пературы, влажности) со временем изменяются [1—3]. Задача раннего обнаружения дефектов в КМ является актуальной, а ее решение связано с их прочностными исследованиями при статическом воздействии нагрузок.

В авиационной отрасли при изготовлении деталей из КМ наиболее широко применяются методы автоклавного и вакуумного формования [4—5]. Автоклавная технология позволяет изготавливать крупногабаритные изделия с низкой пористостью пластиков и высокими требованиями к их качеству. При изготовлении слабо нагруженных изделий из КМ используется вакуумное формование. Однако из-за приложения меньшего внешнего давления при формировании они проигрывают по эксплуатационным характеристикам по сравнению с автоклавным методом. К достоинствам вакуумного метода относят простоту и минимальные затраты на подготовку и проведение процесса формования. Выявление дефектов на ранней стадии развития разрушения образцов, выполненных из композитов, изготовленных методами автоклавного и вакуумного формования, является актуальной задачей.

При прочностных испытаниях образцов из КМ часто используется метод акустической эмиссии (АЭ), так как он является наиболее чувствительным и осуществляет локацию дефектов в режиме реального времени, определяется тип разрушения, степень опасности и т.д. К основным информативным параметрам сигналов АЭ относится локация, структурный коэффициент, энергетический параметр *MARSE*, доминантные частоты [6—9].

Цель работы — определение локации и типа дефектов при статическом нагружении образцов из углепластика АСМ, изготовленных способами автоклавного и вакуумного формования, с использованием ультразвукового, акустико-эмиссионного методов, тензометрии и микроанализа структуры углепластиков.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статические испытания образцов проводили из углепластика АСМ 102-С130UD (АСМ) с укладкой монослоев $[\pm 45/0/90/0/+45/0/-45/0/+45_2/0/45/0/+45/0/90/0/\pm 45]$ и геометрическими размерами $600 \times 100 \times 2,7$ мм. В центре образцов выполнялось сквозное отверстие диаметром 12 мм, являющееся концентратором напряжения. Исследовались две группы образцов из данного углепластика, изготовленные методами вакуумного и автоклавного формования. В табл. 1 приведены значения максимальных статических нагрузок, прикладываемых к образцам, установленным в гидравлическую нагружающую машину MTS-50.

Нагрузка изменялась ступенчато с выдержкой на каждой ступени в течение $\Delta t = (1,5 - 2)$ мин. До нагрузки, равной $P = 70$ кН, ее увеличение осуществлялось через интервал, равный $\Delta P_1 = 10$ кН, а после достижения 70 кН — через интервал $\Delta P_2 = 5$ кН. Контроль за процессом разрушения образцов осуществлялся с использованием ультразвукового (УЗ), АЭ и тензометрических методов. Кроме того, после испытаний образцов проводился микроанализ их структуры.

Для регистрации АЭ-информации на каждый образец устанавливались четыре преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) типа GT300, подключенных к микропроцессорной системе СЦАД-16.12 [8—10]. Деформация в образцах, где были наклеены проволоочные тензодатчики типа ПКС-8 сопротивлением $R = 120$ Ом, базой $L = 10$ мм, коэффициентом тензочувствительности $K = 2,12$ (свидетельство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.28.007 № 54961, регистрационный номер 57245—14), измерялась быстродействующей микропроцессорной тензометрической системой «Динамика-3» (сертификат № 66973—17).

При УЗ-контроле дефектоскоп OmniScan одновременно со сбором массива *A*-сканов проводил их томографическую обработку. Результаты контроля отображались как виды и сечения объекта контроля, а именно сканы (развертки) типа *B*, *C* и *D* по трем координатным осям: оси сканирования *S*, оси индексирования *I*, оси ультразвука (глубины залегания) *U*. По результатам исследований определено, что метод, основанный на ультразвуковых фазированных решетках, и оборудование OmniScan являются оптимальными для оценки и оформления результатов контроля. При этом контроль фазированными решетками имеет преимущества перед обычным УЗ-контролем, так как он позволяет обследовать геометрически сложные детали без необходимости перемещения объекта или датчика и получать реальные изображения положения и размеров обнаруженных дефектов [12, 13].

Локация сигналов АЭ в области отверстия начиналась при нагрузках, составляющих более 50 % от разрушающего значения. Образцы не доводились до полного разрушения, так как после нагружения они подвергались микроанализу структуры углепластика АСМ на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP с увеличением до 1 млн крат, с разрешающей способностью 2 нм, при ускоряющих напряжениях от 5 до 20 кВ.

Таблица 1

Значения максимальных нагрузок, полученных при статических испытаниях образцов из углепластика АСМ

Номер группы	Номер образца	Технология изготовления	Максимальная нагрузка, кН	Нагрузка начала локации в области отверстия, кН
1	1	Вакуумное формование	110	50
	3		115	30
2	2	Автоклавное формование	115	70
	4		125	50

На рис. 1 показана локация сигналов АЭ, зарегистрированных для образцов из углепластика АСМ [9]. В процессе увеличения статической нагрузки выявлены особенности, характерные для каждого метода формования углепластика АСМ. Локация сигналов в области отверстия образца 1, выполненного с использованием вакуумного формования, начиналась при нагрузке, равной 50 кН (рис. 1а). При этом активность данного источника проявлялась в процессе всего нагружения образца 1 (рис. 2а), изготовленного методом вакуумного формования. На его рабочей поверхности локализованы сигналы АЭ, свидетельствующие о разрушениях углепластика, а их суммарное количество равно 638.

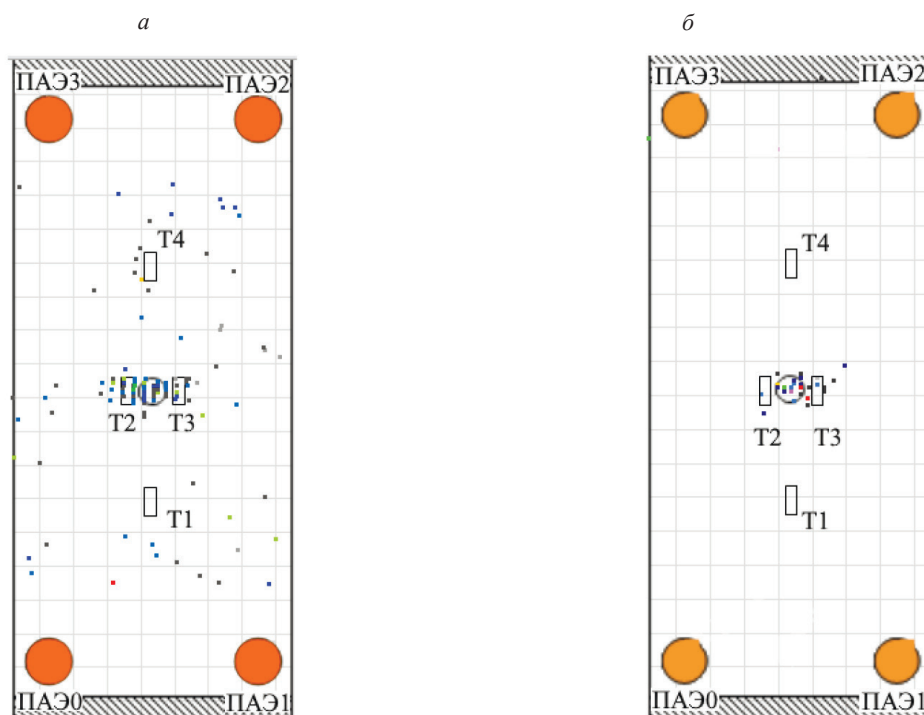


Рис. 1. Локация сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образцов 1 (а) и 2 (б).

Образец 2 выполнен методом автоклавного формования и нагружался до разрушающей нагрузки, равной 90 кН. При развитии дефектов в зоне концентратора напряжений осуществлялась локация сигналов АЭ. Источники сигналов с наибольшей суммарной амплитудой находились в горизонтальной плоскости отверстия. В образце 2 (рис. 1б) локация в области отверстия началась при нагрузке более 70 кН. В образце, выполненном методом автоклавного формования, количество сигналов, зарегистрированных из области отверстия, составило около 100, что значительно меньше по сравнению с образцом 1. На рис. 2б показаны зависимости суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени для образца 2.

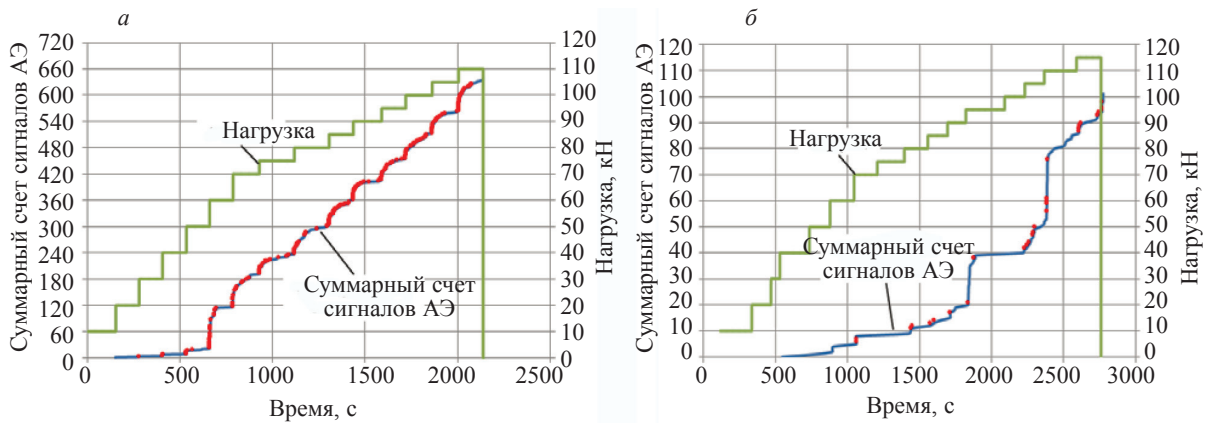


Рис. 2. Зависимости суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени, зарегистрированные при нагружении образцов 1 (а) и 2 (б). ● — сигналы АЭ, локализованные в области отверстия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе испытаний проанализированы основные информативные параметры сигналов АЭ, локализованные в образцах в области отверстия. Для испытанных образцов исследовались зависимости энергетических (амплитуда, $MARSE$) и частотных (частота, структурный коэффициент) параметров сигналов АЭ от нагрузки. Приведены зависимости основных информативных параметров сигналов АЭ от нагрузки для образцов 1 (рис. 3) и 2 (рис. 4). При нагружении образца 1 отмечалось, что увеличение нагрузки оказывает влияние на изменения амплитуды, структурного коэффициента и энергетического параметра $MARSE$, которые определялись как [10]

$$MARSE = \int_t \overline{U(t)} \cdot dt, \quad (1)$$

где $U(t)$ — огибающая сигнала АЭ, которая определялась его амплитудой и длительностью.

Структурный коэффициент сигналов АЭ находился из формулы [9, 10]:

$$P_{D_{42}}(f) = \frac{\max D_4}{\max D_2}, \quad (2)$$

где D_2, D_4 — наборы коэффициентов вейвлет-разложения 4 и 2 уровней детализации, полученные при частоте дискретизации исходного сигнала, равной $f = 2$ МГц.

Уровень детализации 2 соответствует полосе частот от 250 до 500 кГц, уровень детализации 4 — полосе частот от 63 до 125 кГц.

У образца 1 наблюдалось увеличение энергетических параметров (рис. 3а, б) при повышении нагрузки и практически неизменяемые частотные параметры (рис. 3в, г). Наиболее значимые изменения всех параметров отмечались для сигналов АЭ, зарегистрированных датчиком ПАЭ0. Структурный коэффициент (рис. 3г), определяемый по формуле (2), изменялся характерным для композитов образом: сначала наблюдалось уменьшение, а затем — незначительное увеличение.

При нагружении образца 2 локация сигналов АЭ в рабочей зоне начиналась только при нагрузке $P = 70$ кН. Отмечалось, что разброс параметров сигналов АЭ, зарегистрированных ПАЭ пьезоантенны, больше, чем при нагружении образца 1.

Кроме того, максимальные значения энергетических параметров (рис. 4а, б) образца 2 были в два раза больше, чем при нагружении образца 1 (см. рис. 3а, б). Однако, также как и у образца 1, увеличение амплитуды и $MARSE$ происходило до нагрузки 100 кН, а затем наблюдалось их уменьшение. Медианная частота варьировалась от 50 до 350 кГц, а структурный коэффициент — от 0,6 до 1,6 (рис. 4в, г). Следовательно, механизмы разрушения углепластика АСМ в образцах 1 и 2 были различны.

Локация сигналов АЭ при испытаниях образцов из углепластика АСМ осуществлялась с использованием модифицированного двухинтервального метода определения времени их прихода. Двухинтервальный коэффициент рассчитывался как [10]

$$K(t, \tau_1, \tau_2) = \frac{A(t, \tau_2) - A(t - \tau_1, \tau_1)}{A(t - \tau_1, \tau_1)}, \quad (3)$$

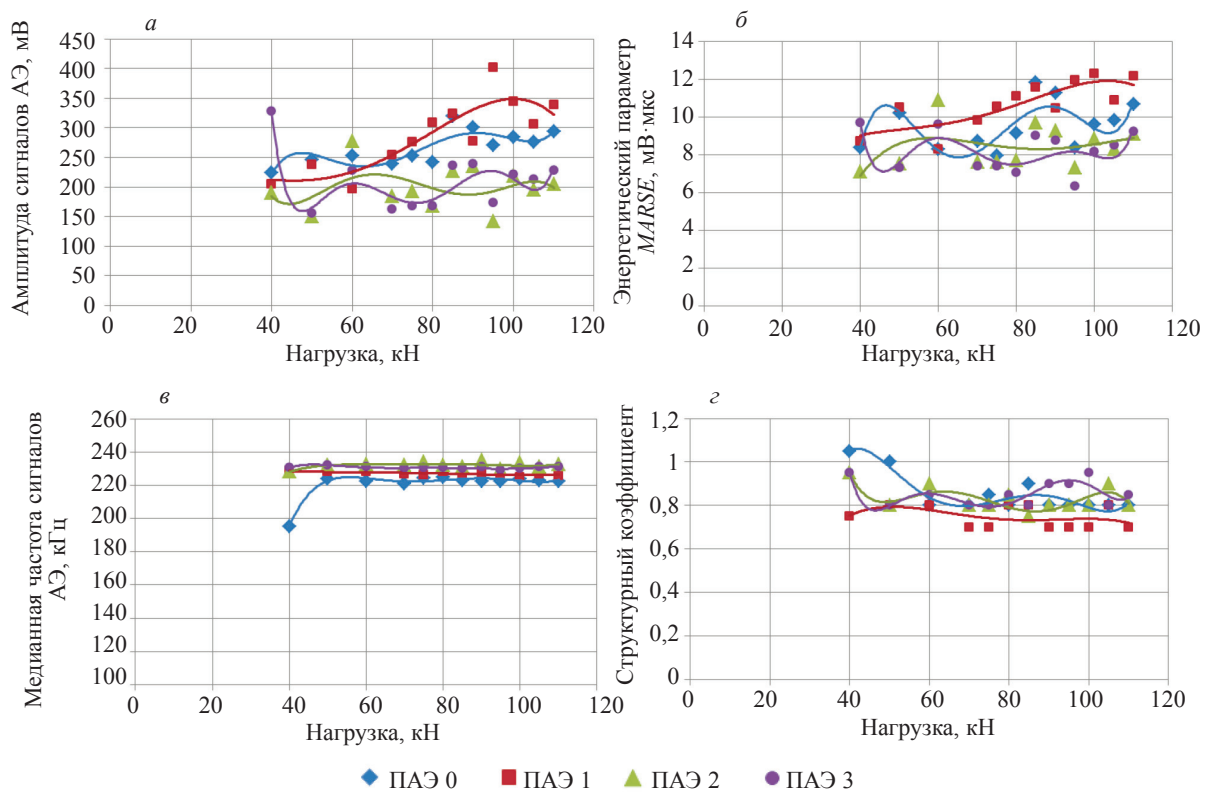


Рис. 3. Зависимость основных информативных параметров сигналов АЭ от нагрузки при нагружении образца 1: *a* — амплитуды; *б* — энергетического параметра $MARSE$; *в* — медианной частоты; *г* — структурного коэффициента.

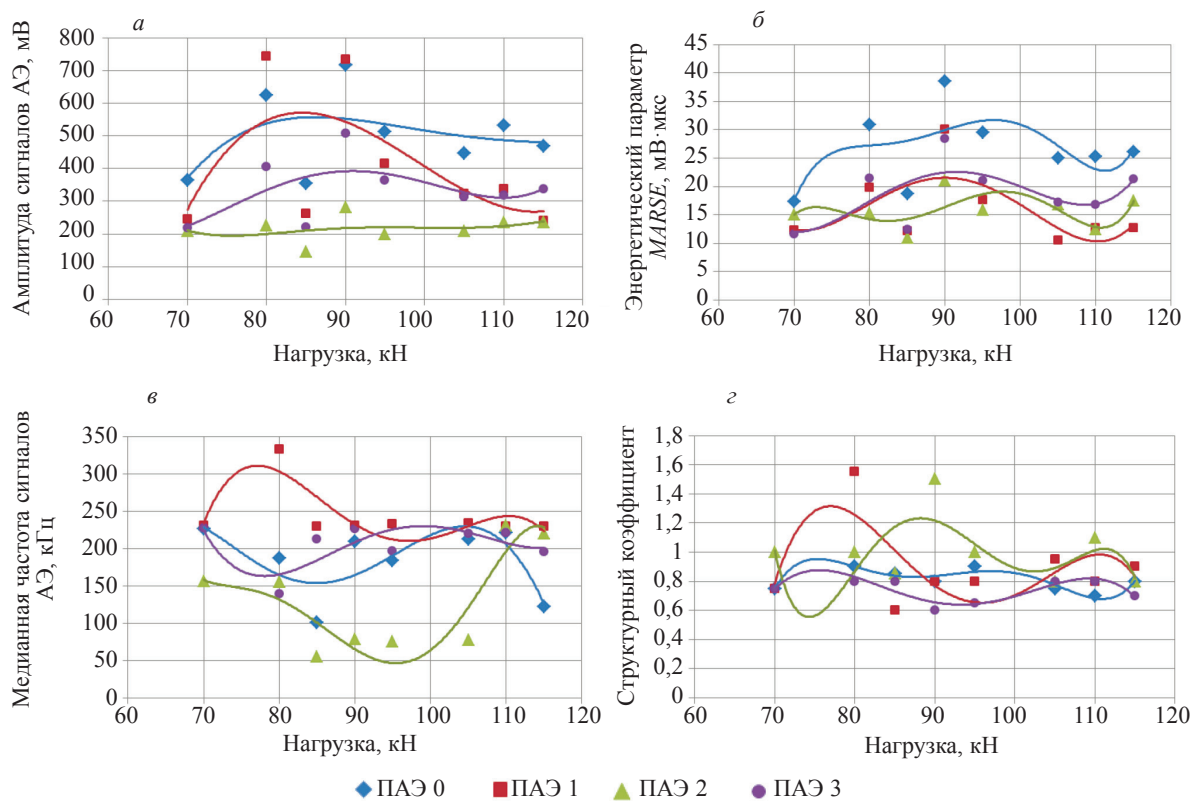


Рис. 4. Зависимость основных информативных параметров сигналов АЭ от нагрузки при нагружении образца 2: *a* — амплитуды; *б* — энергетического параметра $MARSE$; *в* — медианной частоты; *г* — структурного коэффициента.

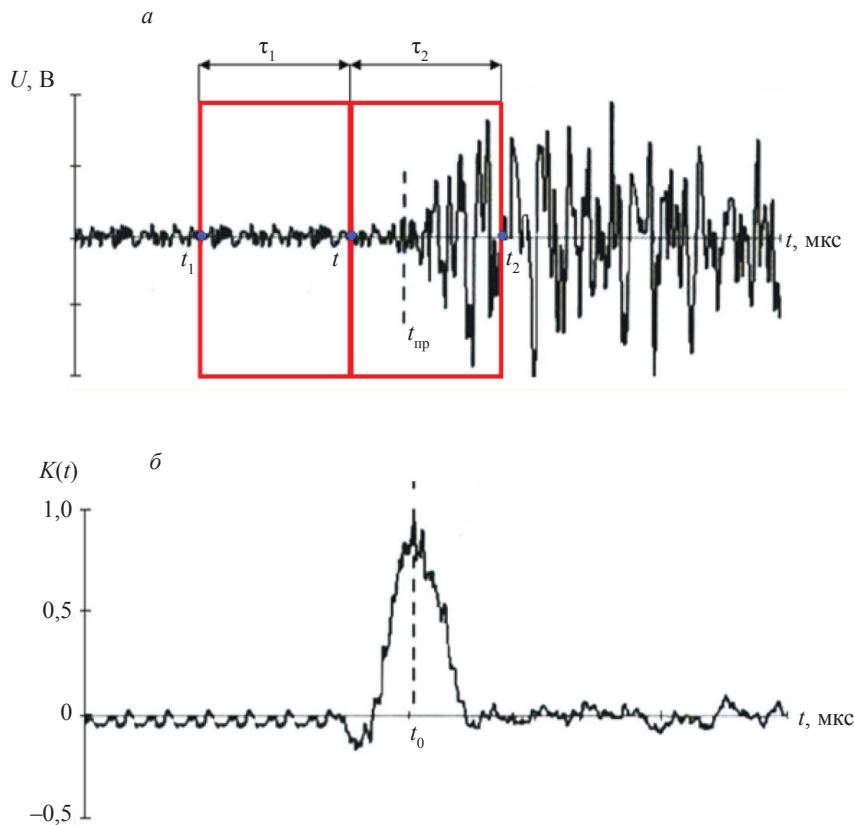


Рис. 5. Осциллограмма сигнала АЭ (а) и соответствующее изменение двухинтервального коэффициента $K(t)$ (б).

где $A(t, \tau) = \int_t^{t+\tau} |U(t)| \cdot dt$ — модуль амплитуды сигнала АЭ; τ_1, τ_2 — длительность первого и второго временных «окон», перемещающихся по реализации сигнала АЭ (рис. 5а).

Время прихода t_0 сигнала АЭ на рис. 5б соответствует максимуму двухинтервального коэффициента $K(t)$. Это и есть максимальная скорость перестройки структуры сигнала, т.е. момент прихода сигнала АЭ на датчик ПАЭ [8].

Анализ результатов тензометрирования показал, что изменения относительных деформаций при увеличении нагрузки происходили линейно (рис. 6). Отмечалось, что значения относительных деформаций для образцов из углепластика АСМ, изготовленных методами вакуумного и автоклавного формования, были примерно одинаковыми и достигали $6,5 \cdot 10^{-3}$ относительных единиц деформаций (о.е.д.).

Показания тензодатчиков Т2 и Т3, наклеенных в области отверстия, были больше показаний тензодатчиков Т1 и Т4, более удаленных от отверстия. При этом в образце 1, изготовленным методом вакуумного формования, данная разница более заметная по сравнению с образцом 2, изготовленным методом автоклавного формования. Таким образом, результаты тензометрии подтвердили, что в композиционном образце, изготовленном автоклавным методом, распределение и изменение деформаций происходило равномерно по всей площади рабочей зоны, в отличие от образца, изготовленного вакуумным методом.

При УЗ контроле, выполняемом прибором Omniscan X3, применялся преобразователь Olympus NDT 5L-64-NW1 с 64-элементной антенной фазированной решеткой [11]. Для сканирования исследуемых образцов из углепластика АСМ толщиной не более 3 мм оптимальной являлась настройка от 6 до 8 элементов фазированной решетки, одновременно работающих на прием и передачу УЗ-сигналов. При использовании большего количества элементов фазированной решетки скорость сканирования уменьшалась.

Сканирование выполнялось зондирующим импульсом без акустической задержки с частотой, равной 5 МГц, и длительностью, составляющей 50 нс. Данные параметры зондирующего импульса применяются для контроля изделий толщиной не более 10 мм. Амплитуда УЗ-сигнала

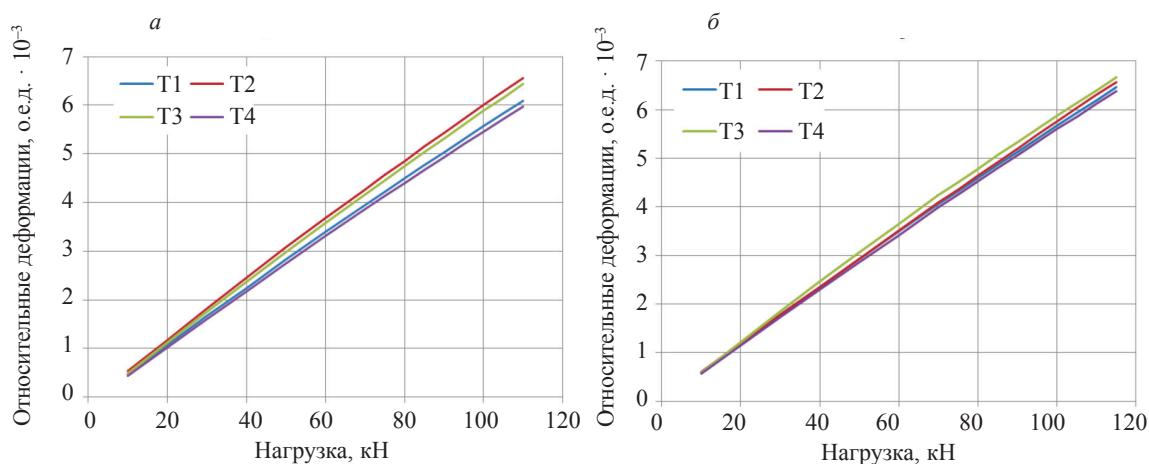


Рис. 6. Зависимости деформаций от нагрузки, зарегистрированные при нагружении образцов 1 (а) и 2 (б).

в бездефектной зоне образца составляла 85 дБ, скорость сбора импульсов приемником от генератора равна 120 Гц, угол ввода луча составлял 0° . Фокус УЗ-пучка направлен в точку, соответствующую 0,5 от толщины образца. Шаг сканирования поверхности образца соответствовал размеру 1-2 элементов фазированной решетки.

Результатами УЗ-контроля дефектоскопом Omniscan X3 являлись А, В и С-сканы, которые показывали местоположение, размер и ориентацию дефектов (рис. 7 — рис. 10).

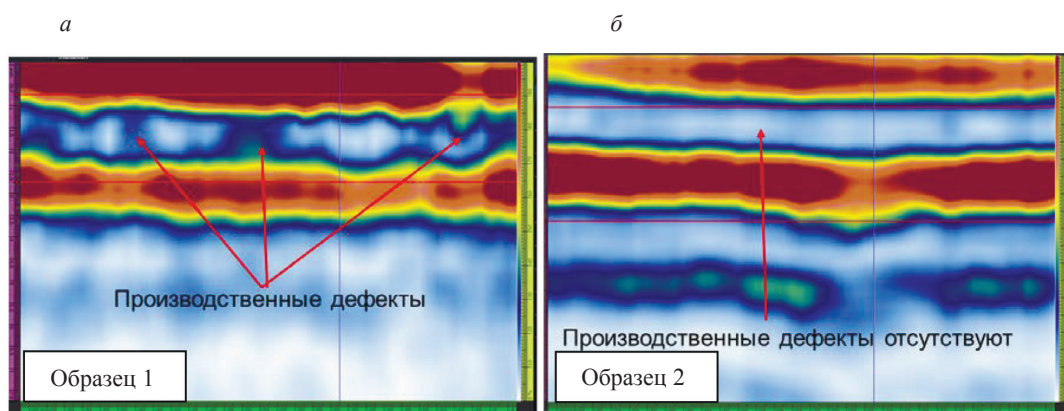


Рис. 7. Ультразвуковые S-сканы образцов из углепластика, изготовленные методами вакуумного (а) и автоклавного (б) формования из области наклейки тензодатчика Т1 (до нагружения).

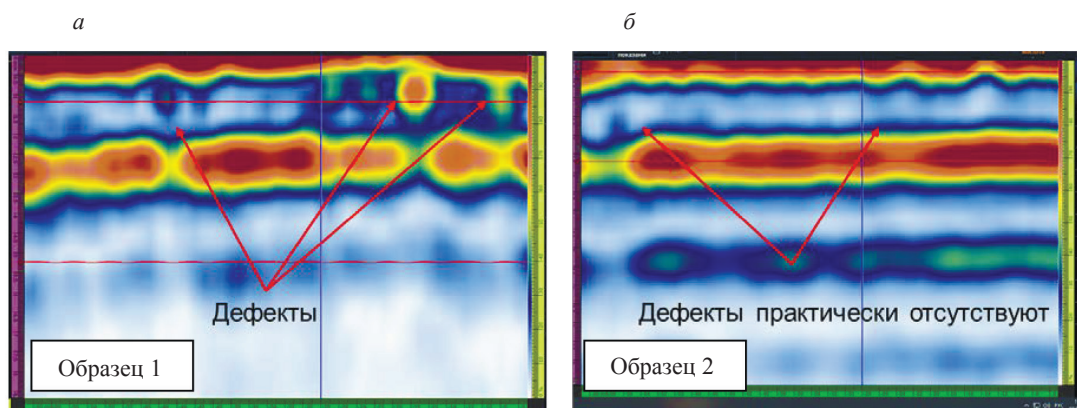


Рис. 8. Ультразвуковые S-сканы образцов из углепластика, изготовленные методами вакуумного (а) и автоклавного (б) формования из области наклейки тензодатчика Т1 (после нагружения).

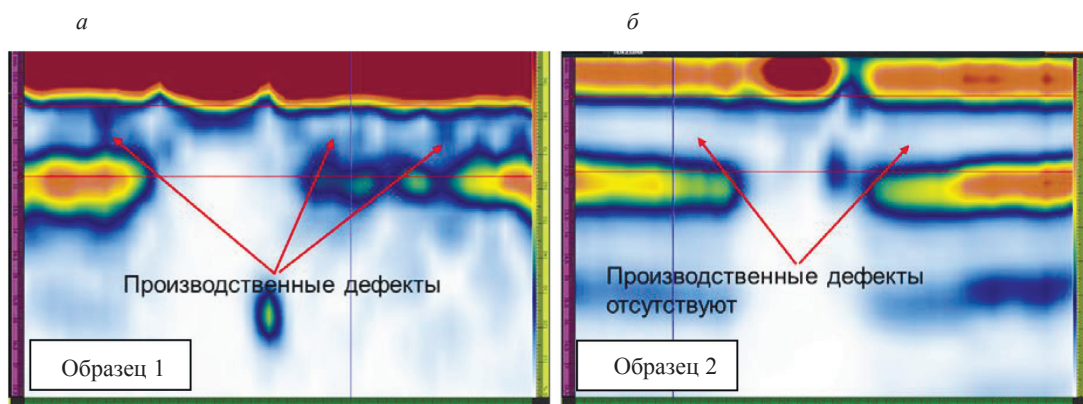


Рис. 9. Ультразвуковые S -сканы образцов из углепластика, изготовленные методами вакуумного (а) и автоклавного формования (б) из области отверстия (до нагружения).

При этом B -скан настраивался на считывание амплитуды, поэтому цветовой градиент на правой стороне изображения зависит от амплитуды принимаемого УЗ-сигнала. Например, красный цвет указывает на высокую амплитуду принимаемого сигнала, а синий — на более низкую амплитуду возвратившихся сигналов. Синий цвет виден на всем B -скане из-за низкого фоновых шума, который всегда присутствует из-за того, что образцы выполнены из композитов, состоящих из углеродного волокна и эпоксидной смолы. Передняя и задняя стенки образца из КМ очерчены толстыми красными полосами и показывают общую толщину композита (по сравнению с измерениями в левой части изображения). Разрыв в донном сигнале (рис. 9, рис. 10) означает отсутствие отражения от материала и соответствует области расположения отверстия в образце.

На рис. 7 — рис. 10 приведены S -сканы областей микродефектов, расположенных на расстоянии 0,5 мм от поверхности. При этом S -скан настраивался на считывание толщины образца. В проводимых испытаниях толщина образцов составляла 2,7 мм, поэтому шкала градиента в правой части изображения задавалась на ожидаемой толщине в диапазоне от 0 до 5 мм.

Изображения скана преобразовывались УЗ-системой в файлы OmniPC. Данные контроля в цифровом виде переносились в компьютер. В программе устанавливаются границы с использованием опорных и измерительных курсоров (отображаются на сканах синими и красными прямыми). Они охватывают область расположения дефекта. Таким образом, по шкале осей координат можно определить его размеры, а также рассчитать площадь разрушения. Для получения S -скана, который отображает результаты УЗ-контроля по всей площади поверхности контролируемого образца, в программе задается пороговое значение амплитуды донного сигнала. При этом определяется контролепригодность зон сканирования объекта контроля. Если при сканировании амплитуда донного сигнала выше порогового значения, то зона сканирования является контролепригодной, если ниже — неkontrolепригодной.

При скорости звука в образце, равной 3000 м/с, минимальная глубина залегания выявленных дефектов составила 0,4 мм. Это хороший показатель по «мертвой зоне» (поверхностному

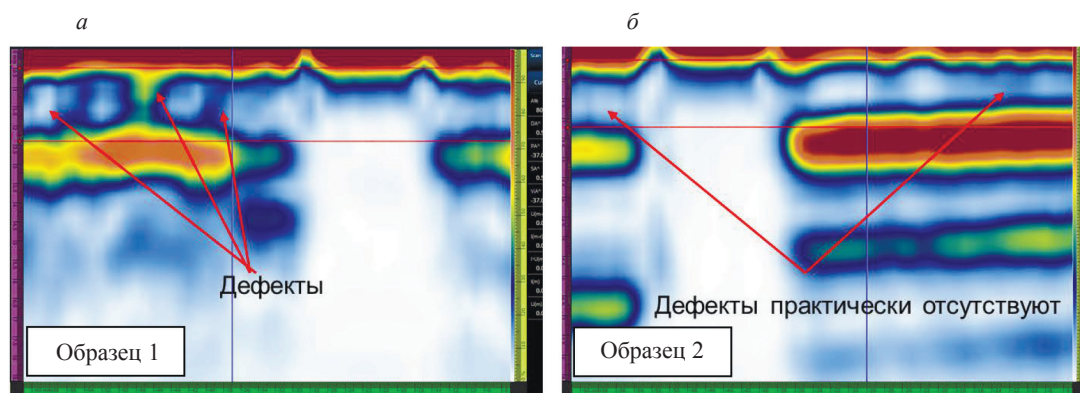


Рис. 10. Ультразвуковые S -сканы образцов из углепластика, изготовленные методами вакуумного (а) и автоклавного (б) формования из области отверстия (после нагружения).

разрешению), который подтверждает высокую чувствительность характеристик генератора и приемника дефектоскопа.

На рис. 7 показаны результаты УЗ-контроля образцов 1 и 2 прибором Omniscan X3 из области установки тензодатчика Т1 (см. рис. 1) [11]. В ненагруженном образце 1, изготовленном методом вакуумного формования, были определены производственные дефекты, к которым относятся отражатели, которые (согласно описанной методике контроля) не являлись критическими и были допустимыми. Однако в образце 2, изготовленном в автоклаве, УЗ-сигналы не были зарегистрированы, а, следовательно, несплошности в структуре композита отсутствовали.

На рис. 8 показаны *S*-сканы из области установки тензодатчика Т1 после статического нагружения образцов 1 и 2. При этом в образце 1, изготовленном вакуумным формованием, после статического нагружения появились дополнительные дефекты. В автоклавном образце 2 после статического нагружения дефекты практически отсутствовали.

На рис. 9 приведены результаты УЗ-сканирования ненагруженных образцов из области отверстия. Анализ выявил наличие производственных дефектов в ненагруженном образце, изготовленном методом вакуумного формования (рис. 9а), и развитие их после приложения нагрузки (рис. 10а). В образце, изготовленном в автоклаве как до, так и после статического нагружения, дефекты практически отсутствовали (рис. 9б, рис. 10б).

После проведения статических испытаний образцов и их последующего УЗ-контроля были вырезаны фрагменты из области отверстия и расположения тензодатчика Т1 (рис. 11). Для проведения микроанализа структуры и изучения внутренних микроразрушений материала углепластика по всей толщине, исследуемая поверхность шлифа срезалась через все слои образца под углом $(1\text{—}2)^\circ$ перпендикулярно пучку ввода растрового микроскопа (рис. 11а, б).

На исследуемую поверхность шлифов напылялся тонкий проводящий слой для снятия заряда и экранирования падающего пучка от накопленного в объеме материала заряда. Слой меди толщиной 10—15 нм наносился на установку для ионного напыления Quorum A150TES с внутренней средой, заполненной аргонном.

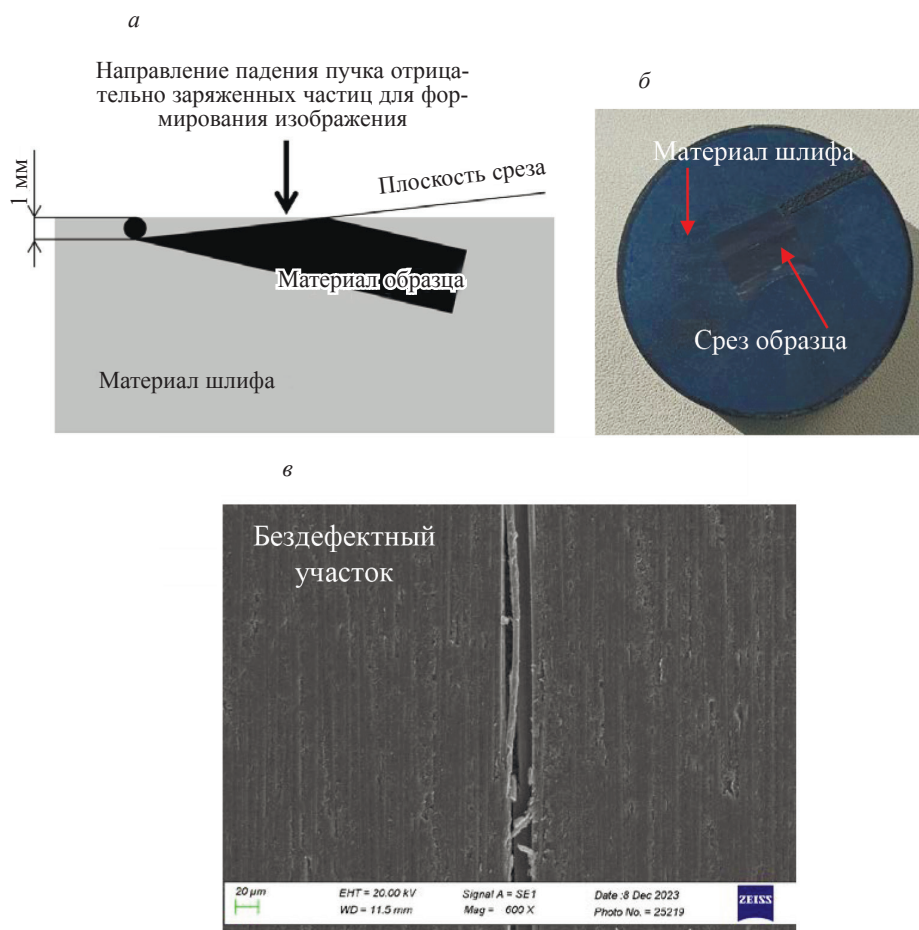


Рис. 11. Схема микроисследования материала (а); фотография шлифа вид сверху (б); изображение участка шлифа, полученное при его анализе микроскопом Carl Zeiss EVO 50 XVP (в).

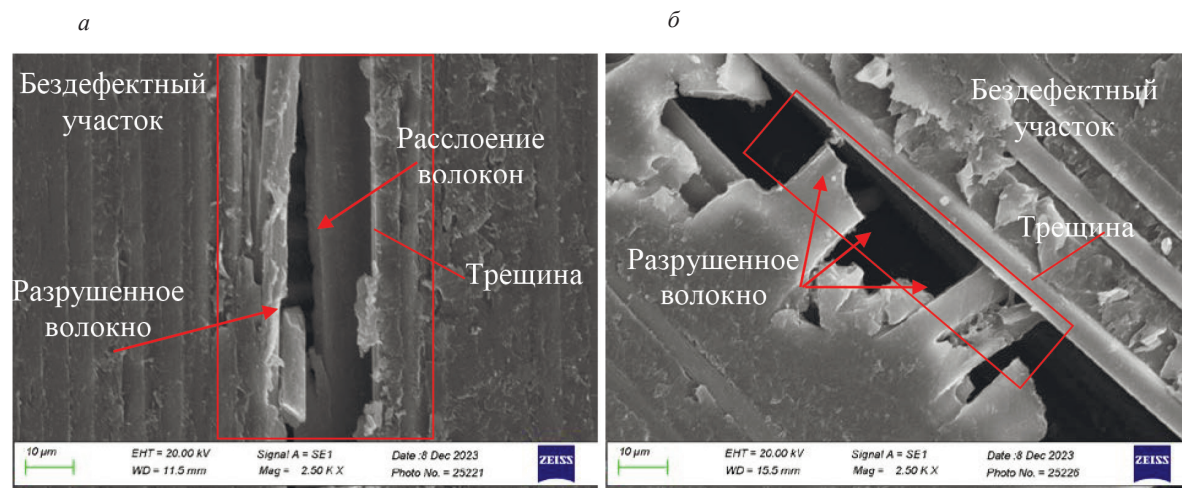


Рис. 12. Разрушения в шлифе образца 1, изготовленного методом вакуумного формования из области установки тензодатчика T1 (а) и отверстия (б).

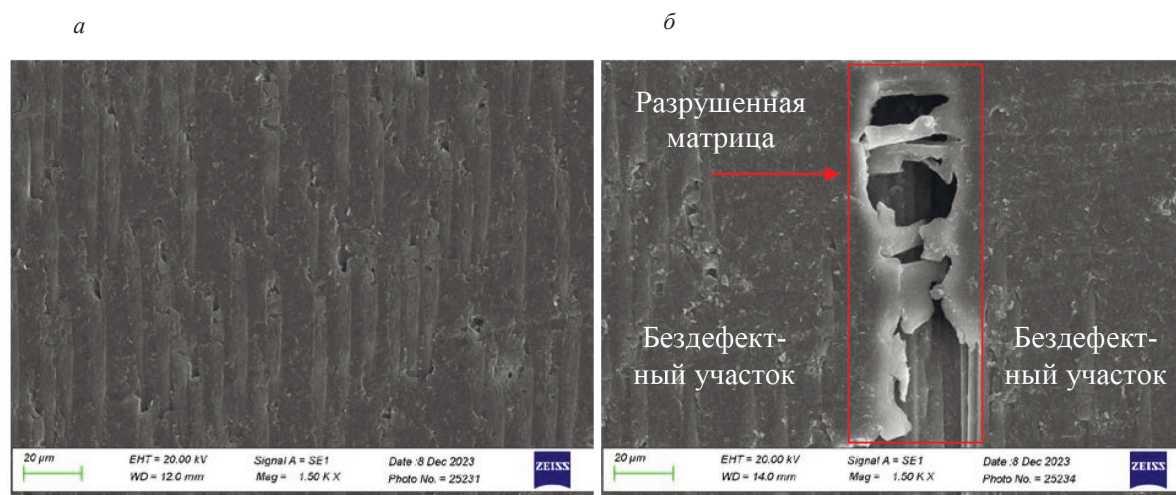


Рис. 13. Разрушения в шлифе образца 2, изготовленного методом автоклавного формования из области тензодатчика (а) и отверстия (б).

Все изготовленные шлифы подробно исследовались в растровом микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP. Наиболее выраженные дефекты в исследуемых областях были сохранены в виде изображений, которые позволяли определить бездефектные и разрушенные участки материала (рис. 11б). Выполнялся микроанализ структуры углепластика АСМ после испытаний несущего слоя материала образца, вырезанного из области отверстия, позволивший определить разрывы волокон, повреждения матрицы и расслоения (рис. 12, рис. 13).

Микроструктура материала бездефектных участков образцов представляла собой непрерывную термореактивную эпоксидную фазу (полимерную матрицу), в которой распределены фазовые образования, обогащенные термопластом. Данные термопластичные образования включают домены эпоксидного полимера, размер которых может достигать нескольких микрометров.

В полимерной матрице углепластика не выявлено посторонних дисперсных частиц термопластичной фазы. Распределение волокон армирующего наполнителя находилось в диапазоне от 4 до 6 мкм. Максимальная величина прослоек полимерной матрицы между волокнами достигала 10 мкм. При этом на макроуровне наполнитель распределен достаточно равномерно.

Нарушение микроструктуры материала в виде расслоения и разрушения армирующих волокон заметно при сканировании поверхности срезов образцов. Отмеченные дефекты наблюдались вблизи отверстия. При этом количество сигналов АЭ существенно не снижалось.

ВЫВОДЫ

1. По данным АЭ-контроля установлено, что в образцах, изготовленных с использованием вакуумного формования, количество локализованных сигналов АЭ практически в десять раз больше по сравнению с количеством сигналов в образцах, изготовленных автоклавным методом. Тензометрия позволила определить, что деформация в образцах, изготовленных методом автоклавного формования, происходит более равномерно на всей площади рабочей зоны. В образцах, изготовленных методом вакуумного формования, в области отверстия отмечались большие деформации, зарегистрированные тензодатчиками Т2, Т3, по сравнению с результатами, полученными тензодатчиками Т1 и Т4.

2. Ультразвуковой контроль образцов, изготовленных вакуумным формованием, до их статического нагружения, выявил преобразователем с фазированной решеткой производственные дефекты, к которым относятся отражатели в материале. Приложение растягивающей нагрузки к таким образцам приводило к увеличению размеров имеющихся дефектов, а также к зарождению новых. Минимальная глубина их залегания составила 0,4 мм, что является хорошим показателем по «мертвой зоне» (поверхностному разрешению), который подтверждает высокую чувствительность характеристик генератора и приемника дефектоскопа.

В образцах, изготовленных методом автоклавного формования, производственные дефекты УЗ-контролем не обнаружены. Следовательно, несплошности в структуре материала композита, выполненного автоклавным методом, не определены. Испытания данных образцов показали, что число дефектов и их размеры существенно меньше, чем при вакуумном формовании.

3. Микроанализ структуры испытанных образцов, выполненных вакуумным методом, выявил дефекты, связанные с разрушением волокон, растрескиванием матрицы, расслоением. Они были обнаружены как в области отверстия, так и в области наклейки тензодатчика Т1. В образце, изготовленном в автоклаве, как до, так и после статического нагружения, дефекты практически отсутствовали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фейгенбаум Ю.М., Миколайчук Ю.А., Метелкин Е.С., Батов Г.П. Место и роль неразрушающего контроля в системе поддержания летной годности композитных конструкций // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 9. С. 71—82.
2. Lehmann M., Bueter A., Schwarzsaupt O. Structural health monitoring of composite aerospace structures with acoustic emission // Journal of Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172—193.
3. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). С. 66—75.
4. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (3). С. 834—839.
5. Леуцкова И.В. Принципиальные технологии изготовления авиационных конструкций из композиционных материалов: RTM и автоклавное формование // Международный научный журнал «Инновационная наука». 2018. № 1. С. 14—16.
6. Баишков О.В., Проценко А.Е., Брянский А.А., Ромашко Р.В. Диагностика полимерных композиционных материалов и анализ технологий их изготовления с использованием метода акустической эмиссии // Механика композиционных материалов. 2017. Т. 53. № 4. С. 765—774.
7. Сятковский А.И., Черняева Е.В., Волков А.Е., Вьюненко Ю.Н. Влияние полимерных слоев защитных конструкций на параметры акустической эмиссии // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 6. С. 35—40.
8. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кареев А.Е., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Бобров А.Л., Бояркин Е.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение / Машиностроение—Полет, 2004. 368 с.
9. Степанова Л.Н., Серьезнов А.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С. Использование вейвлет-преобразований для локализации сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2017. № 10. С. 18—25.
10. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Лебедев Е.Ю., Канифадин К.В., Киреев В.В., Вонсовский А.В. Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки. Новосибирск: Наука, 2018. 272 с.
11. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. USA, Waltham: Olympus NDT, 2007. 491 p.
12. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С., Чертищев В.Ю. Ультразвуковой контроль образцов в процессе разработки и испытаний новых марок углепластика // Труды ВИАМ. 2021. № 12. С. 61—65.

13. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С., Смотров С.А., Иванов В.И. Контроль образцов из полимерных композиционных материалов с использованием ультразвуковых антенных решеток // Дефектоскопия. 2022. № 6. С. 3—16.

REFERENCES

1. Feygenbaum Yu.M., Mikolaychuk Yu.A., Metelkin E.S., Batov G.P. The place and role of nondestructive testing in the system of continuing airworthiness of composite designs // Scientific bulletin of GosNII GA. 2015. No. 9. P. 71—82.
2. Lehmann M., Bueter A., Schwarzaupf O. Structural health monitoring of composite aerospace structures with acoustic emission // Journal of Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172—193.
3. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Features of technology and polymer composite materials for the manufacture of wings of advanced aircraft (review) // Proceedings of VIAM. 2022. No. 1(107). P. 66—75.
4. Veshkin E.A. Postnov V.I., Abramov P.A. Ways to improve the quality of parts made of PCM in vacuum forming // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012. V. 14. No. 4 (3). P. 834—839.
5. Leshchukova I.V. Fundamental technologies for manufacturing aircraft structures from composite materials: RTM and autoclave molding // International scientific journal «Innovative Science». 2018. No. 1. P. 14—16.
6. Bashkov O.V., Protsenko A.E., Bryanskii A.A., Romashko R.V. Diagnostics of polymer composite materials and analysis of their production technology by using the method of acoustic emission // Mechanics of Composite Materials. 2017. V. 53. No. 4. P. 533—540.
7. Syatkovsky A.I., Chernyaeva E.V., Volkov A.E., Vyunenkov Yu.N. Influence of polymer layers of protective structures on acoustic emission parameters // Deformatsiya i Razrushenie materialov. 2022. No. 6. C. 35—40.
8. Seryeznov A.N., Stepanova L.N., Muravyov V.V., Komarov K.L., Kareev A.E., Kabanov S.I., Lebedev E.Yu., Kozhemyakin V.L., Bobrov A.L., Boyarkin E.V., Muravyov M.V., Bekher S.A. Diagnostics of transport objects by the acoustic emission method. M.: Mashinostroenie / Mashinostroenie—Polet, 2004. 368 p.
9. Stepanova L.N., Seryeznov A.N., Kabanov S.I., Ramazanov I.S. Wavelet transform application for acoustic emission signals location // Testing. Diagnostics. 2017. No. 10. P. 18—25.
10. Seryeznov A.N., Stepanova L.N., Kabanov S.I., Ramazanov I.S., Lebedev E.Yu., Kanifadin K.V., Kireenko V.V., Vonsovsky A.V. Acoustic emission testing of welding defects. Novosibirsk: Science, 2018. 272 p.
11. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Olympus NDT, USA, Waltham, 2007. 491 p.
12. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S., Chertishchev V.Yu. Ultrasonic testing of specimens at the development and testing process of new CFRP grades // Proceedings of VIAM. 2021. No. 12. P. 61—65.
13. Bazulin A.E., Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh., Tikhonov D.S., Smotrova S.A., Ivanov V.I. Testing samples made of polymer composite materials using ultrasonic antenna arrays // Defektoskopiya. 2022. No. 6. C. 3—16.

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОЙ ТОМОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СИГНАЛОВ ОТ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОДОВ

© 2024 г. Цянь Чжан^{1,*}, Хонг Мо³, Руксуэ Ли^{1,2}, Чэньхуа Лян^{1,2,**}, Цзюньхуа Луо⁴

¹Научно-технологический университет Гуанси,

Китай 545000 Лючжоу

²Ключевая лаборатория Гуанси по синтезу многомерной информации
для интеллектуальных транспортных средств, Китай

³Куньминский университет науки и технологий, Китай 650031 Куньмин

⁴Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

E-mail: *QianZhang283370482@163.com; **chenghua.liang@gxust.edu.cn

Поступила в редакцию 01.03.2024; после доработки 01.04.2024

Принята к публикации 05.04.2024

Электроемкостная томография (ЭЕТ) относится в визуальным методам неразрушающего контроля. Относительное распределение положения между электродами и дефектом влияет на точность восстановленного изображения. Для решения этой проблемы предлагается метод реконструкции изображения и алгоритм слияния изображений системы ЭСТ на основе вращающихся электродов. Сначала для восстановления экспериментальной модели применяются 4 алгоритма восстановления изображения, наилучшие результаты демонстрирует итерационный алгоритм Ландвебера, основанный на регуляризации Тихонова. Затем, вращая 12 электродов 4 раза, мы можем получить 5 наборов данных о емкости и получить 5 изображений. Наконец, результаты слияния могут быть получены путем выполнения адаптивного взвешенного слияния этих 5 изображений. Результаты показывают, что метод адаптивного взвешенного слияния изображений на основе вращения электродов улучшает качество реконструированных изображений и эффективно уменьшает артефакты.

Ключевые слова: адаптивное взвешенное слияние, электроемкостная томография (ЭЕТ), восстановление изображения, электроды вращения, неразрушающий контроль.

NONDESTRUCTIVE TESTING METHOD FOR ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY BASED ON IMAGE RECONSTRUCTION OF ROTATING ELECTRODES

© 2024 Qian Zhang^{1,*}, Hong Mo⁴, Ruxue Li^{1,2}, Chenghua Liang^{1,2,**}, Junhua Luo⁴

¹Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, 545000 China

²Guangxi Key Laboratory of Multidimensional Information Fusion for Intelligent Vehicles, China

³Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology,
Kunming, 650031 China

⁴Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

E-mail: *QianZhang283370482@163.com; **chenghua.liang@gxust.edu.cn

The electrical capacitance tomography (ECT) is a visual nondestructive testing technology. The relative positional distribution between the electrodes and the phantom object affects the accuracy of the reconstructed image. To solve this problem, an image reconstruction method and image fusion algorithm of ECT system based on rotating electrodes are proposed. First, 4 image reconstruction algorithms are employed to reconstruct the experimental model, the Landweber iterative algorithm based on Tikhonov regularization presents the best performance. Then, by rotation the 12 electrodes 4 times, we can obtain 5 sets of capacitance data, and obtain 5 images. Finally, the fusion results can be obtained by performing the adaptive weighted fusion on these 5 images. Results show that the adaptive weighted image fusion method based on rotation electrodes improves the quality of reconstructed images and effectively reduces the artefacts.

Keywords: adaptive weighted fusion, electrical capacitance tomography (ECT), image reconstruction, rotation electrodes, nondestructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308224060025

1. ВВЕДЕНИЕ

Электроемкостная томография (ЭЕТ) — это неинвазивный метод контроля, который восстанавливает распределение диэлектрических констант в целевой области путем измерения значений емкости с помощью электродных датчиков. ЭЕТ широко используется в промышленности благодаря простой конструкции, высокой скорости получения изображения, низкой стоимости и высокой степени адаптируемости [1—7]. Точность и точность восстановления

изображения являются критическими вопросами в ЭСТ, которые остаются сложной проблемой даже после нескольких десятилетий исследований. Для решения этой проблемы были проведены обширные исследования алгоритмов реконструкции изображений [8—10]. Кроме того, для повышения точности измерения емкости постоянно модернизируются устройства сбора данных [11]. При восстановлении ЭЕТ-изображения увеличение или уменьшение количества электродов датчика существенно влияет на нечеткость восстановления изображения. Увеличение числа электродов может быть ограничено доступным пространством в области измерения и может привести к тому, что данные о емкости окажутся за пределами измеряемого диапазона. В предыдущих исследованиях Peng и др. [12] было показано, что увеличение числа электродов оказывает ограниченное влияние на улучшение качества реконструкции изображения. Помимо этого, увеличение числа электродов подразумевает необходимость использования более сложного и дорогостоящего оборудования для измерения емкости, что делает метод более дорогостоящим и лишает его преимущества в виде низкой стоимости. По этим причинам многие исследователи начали рассматривать новые пути решения проблемы количества электродов, т.е. увеличение количества измеряемых величин, а не числа электродов датчика.

Новые подходы повышают точность изображений за счет учета вращения электрического поля. Этот метод был использован для электрической импедансной томографии с вращающимся датчиком, управляемым шаговым двигателем [13]. Frounchi и Bazzazi [14] также предложили систему ЭЕТ с вращением 4 электродов, но они рассмотрели только использование цилиндрической модели и ЛОП-алгоритма для верификации метода. Murphy и York [15] предложили установить электроды на крыльчатке смесительного сосуда, чтобы улучшить измерение емкости между вращающимися электродами и неподвижными электродами на внутренней стенке сосуда. Позже Liu и др. [16] расширили этот метод на случай использования 16 электродов. Их результаты показывают, что при использовании датчика с 16 электродами, поворачиваемого 2-3 раза для измерения емкости, полученные результаты реконструкции несколько улучшаются. Кроме того, Wajman и др. [17] измеряли поток плотной среды, поворачивая 12 электродов 3 раза. При этом были достигнуты хорошие результаты в разделении поверхности седиментационного слоя и измерении концентрации твердых частиц. Хотя вышеупомянутые исследования смогли повысить точность восстанавливаемых изображений путем вращения электродов, совершенствование этих подходов ограничено. Кроме того, с помощью этого метода сложно добиться существенного уменьшения числа артефактов, возникающих на восстановленных изображениях при измерении на дефектах, что приводит к снижению точности восстановления изображений.

С этой целью предлагается новый подход к слиянию изображений на основе вращающихся электродов. В описанных выше исследованиях вращающихся электродов основной целью является получение большего количества измерений емкости для восстановления изображения путем вращения электродов для улучшения качества независимо восстановленных изображений. Однако новый метод, предложенный в данной работе, заключается в многократном вращении электрода, при котором каждый поворот электрода позволяет получить новый набор данных о емкости и последующем решении обратной задачи отдельно для каждого набора данных о емкости, чтобы получить несколько восстановленных изображений.

2. ПРИНЦИПЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЕТ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЭЛЕКТРОДАМИ

2.1. Процесс восстановления изображений на основе вращающихся электродов

На рис. 1 показан процесс регистрации данных и восстановления изображения для вращающихся 12 электродов. В то время как распределение диэлектрической проницаемости в измеряемой области остается неизменным, положение электродов меняется, и измеренные значения емкости между парами электродов изменяются. В этой системе проводится 66 независимых измерений емкости после полного 360-градусного электрического сканирования. В данной работе система ЭЕТ с 12 электродами имеет угол 30° между соседними электродами, который равномерно разделен на 5 частей (по 6° каждая), и 5 наборов данных о емкости получают после того, как электроды поворачиваются 4 раза. Однако когда 12 электродов поворачиваются 5 раз, то относительное положение между 12 электродами и дефектным объектом остается таким же, как и исходное положение. Основной принцип восстановления изображения заключается в том, что 5 восстановленных изображений получают путем решения обратной задачи для 5 наборов данных, а результаты слияния получают с помощью правил адаптивного взвешенного слияния изображений.

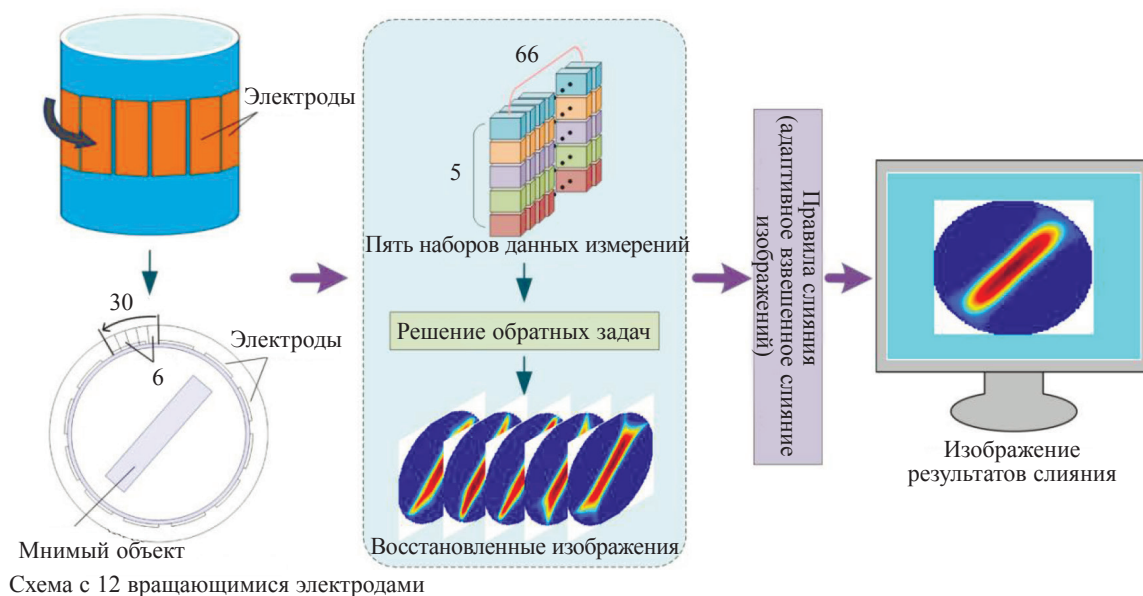


Рис. 1. Процесс получения данных и восстановления изображений для системы ЭЕТ с 12 вращающимися электродами.

2.2. Метод вращения электродов

В данной работе мы рассматриваем метод вращения с 12 электродами, а расчетная модель электрического поля для его вращения представлена на рис. 2. В центре области датчика электродов находится модель прямоугольного сечения с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$. Вращение моделировалось путем изменения положения электродов с возбуждающим напряжением 1 В, что привело к появлению новых граничных условий в конечно-элементной модели [16]. Как показано на рис. 2, рис. 2а — случай отсутствия вращения электрода в исходном положении, рис. 2б — случай двухкратного изменения положения электрода и рис. 2в — случай четырехкратного изменения положения электрода. Обнаружено, что при четырехкратном изменении угла поворота емкостного датчика (6° каждый раз) между 5 восстановленными изображениями будут различия. Для проведения полноценного измерения один из электродов от E1 до E11 поочередно выбирается в качестве возбуждающего электрода, а остальные — в качестве детектирующих электродов, чтобы получить данные о емкости между всеми различными парами электродов. Затем поворот датчика с электродами осуществлялся 4 раза, и каждый раз данные о значении емкости регистрировались таким же образом, как и в первый раз. Таким образом, было получено 5 наборов данных о емкости.

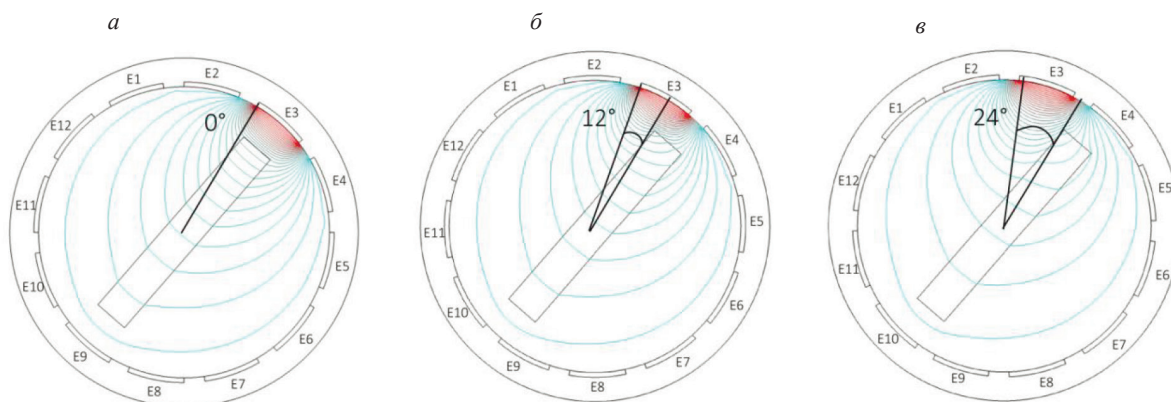


Рис. 2. Смоделированные изменения электрического поля, вызванные вращением датчика с 12 электродами около дефекта прямоугольной формы. E1 — возбуждающий электрод (1В). Начальное положение — 0° (а). Поворот электродов на 12° (б). Поворот электродов на 24° (в).

2.3. Разработка конечно-элементной модели

На рис. 3 показана сетка конечных элементов и расположение электродов. При использовании 12-электродной конструкции радиус $R1$ области визуализации составляет 100 мм, радиус $R2$ стенки трубы — 105 мм, а радиус $R3$ внешнего экрана — 112 мм. Все электроды датчика имеют одинаковый размер и равномерное расположение, а угол между соседними электродами составляет 30° . На рис. 3а показана конечно-элементная сеточная модель. Конечно-элементная модель обычно используется для прямого расчета, чтобы получить уникальное и стабильное решение обратной задачи. Метод конечных элементов (МКЭ) хорошо подходит для решения этой задачи для общих геометрий и неоднородных материалов. Более мелкая сетка обеспечивает как более высокую точность, так и большее пространственное разрешение. По окружности конечноэлементной модели расположено 12 элементов. Каждый элемент обозначает электрод. Рассматриваются данные измерений для 4 поворотов электрода, что соответствует 4 поворотам электрода на 6° , 12° , 18° и 24° соответственно. В методе конечных элементов процесс вращения электрода моделируется путем перемещения каждого электрода, определенного в модели, против часовой стрелки.

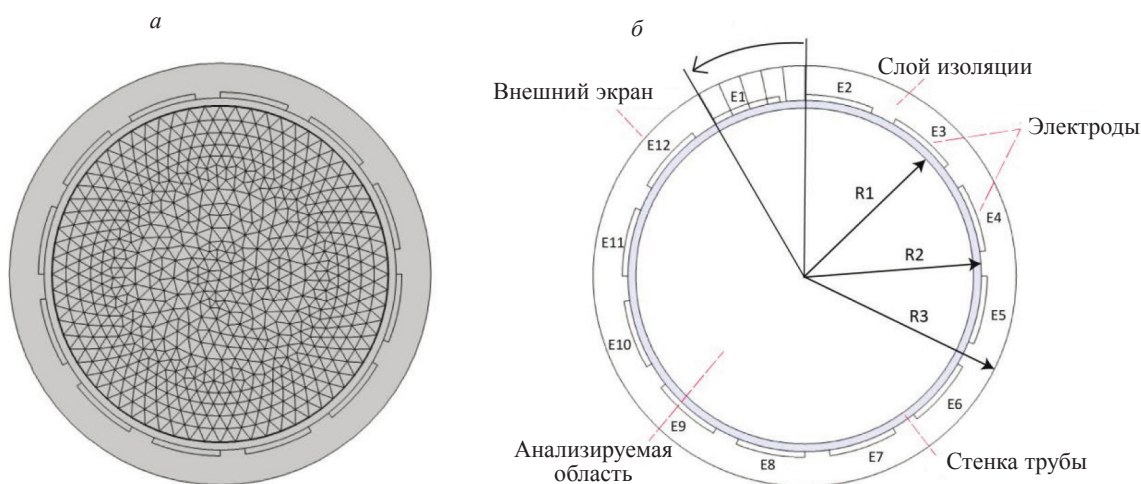


Рис. 3. Конструктивное расположение и сетка конечных элементов для преобразователя с 12 электродами.

3. АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ И СЛИЯНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1. Принципы ЭЕТ

В установке ЭЕТ связь между данными емкости C и измеренным участком распределения диэлектрической проницаемости может быть выражена выражением (1), предполагая, что влияние функции распределения диэлектрической проницаемости на функцию распределения чувствительности невелико:

$$\iint_D \varepsilon(x, y) \cdot S_i(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; D — область измерений; $\varepsilon(x, y)$ — функция распределения диэлектрической проницаемости и $S_i(x, y)$ — функция распределения чувствительности ёмкости между пластинами C_i .

В целом, прямая задача ЭЕТ может быть аппроксимирована линейной функцией и следующее уравнение может быть получено после дискретизации и нормировки уравнения (1):

$$G = S^T C, \quad (2)$$

где S — матрица чувствительности; G — нормированная функция распределения диэлектрической проницаемости; а C — нормированная емкость, величина которой может быть определен по формуле [18]:

$$C = \frac{C_m - C_l}{C_h - C_l}, \quad (3)$$

где C_m — реальная измеренная величина емкости; C_h и C_l — величины емкости, когда область измерений полностью заполнены материалами с высокой и низкой диэлектрическими проницаемостями соответственно.

Матрица чувствительности получается путем разбиения области изображения на мелкие пиксели и определения изменения емкости каждой пары электродов при небольшом изменении проницаемости каждого пикселя относительно пустого фона, т.е. область изображения заполнена материалом с низкой проницаемостью. Затем матрицу чувствительности можно легко рассчитать непосредственно по распределению потенциала, используя [19]:

$$S_{i,j}(x, y) = - \iint_{p(x,y)} \frac{\nabla \varphi_i(x, y)}{V_i} \cdot \frac{\nabla \varphi_j(x, y)}{V_j} dx dy, \quad (4)$$

где $S_{i,j}(x, y)$ — чувствительность между электродом i и электродом j в точке пикселя $p(x, y)$; $\varphi_i(x, y)$ и $\varphi_j(x, y)$ — соответствующие распределения потенциалов в области измерения датчика, когда напряжения возбуждения V_i и V_j приложены на электроды i и j соответственно, если они используются в качестве возбуждающих электродом. В данной работе исследуется разбиение области измерения датчика на сетку 88×88 для решения обратной задачи ЭЕТ. Электродные датчики поворачиваются таким образом, что соответствующие им матрицы чувствительности меняются. Из-за поворота 12-электродного датчика изменяется и его матрица чувствительности, соответствующая различным парам электродов. В 12-электродной системе ЭЕТ можно провести измерение 66 значений емкости между различными парами электродов, и в то же время существует 66 независимых матриц чувствительности. Когда 12 электродов поворачиваются на фиксированный угол, соответствующие 66 матриц чувствительности также поворачиваются. В данной работе матрица чувствительности из 12 электродов в начальном положении обозначается как S_1 . Когда 12 электродов поворачиваются 4 раза, их соответствующие матрицы чувствительности будут также поворачиваться 4 раза, и будут получены 4 матрицы чувствительности S_2, S_3, S_4 и S_5 .

Основная цель обратной задачи ЭЕТ — решить G на основе C и S , как показано в уравнении (5). Поскольку обратная матрица S часто не существует, вместо обратной матрицы обычно используется транспонирование матрицы S . Метод решения обратной задачи был базовый алгоритм линейного обратного проецирования (ЛОП):

$$G = S^T C. \quad (5)$$

3.2. Метод регуляризации Тихонова

Основная идея метода регуляризации Тихонова [20] заключается в преобразовании некорректной задачи в приближенную корректную задачу. В ЭКТ этот алгоритм широко используется для решения обратной задачи некорректной постановки. Его основная идея заключается в минимизации целевой функции:

$$\hat{G} = \min \|SG - C\|^2. \quad (6)$$

При аппроксимации исходной задачи приближенным решением можно ввести параметр α ($\alpha \geq 0$) для минимизации приближенного значения целевой функции:

$$\hat{G} = \min \|SG_\alpha - C\|^2 + \alpha \|G_\alpha\|^2, \quad (7)$$

где α — параметр регуляризации и его уравнение Эйлера выглядит как

$$(S^T \cdot S + \alpha I)G_\alpha = S^T \cdot C, \quad (8)$$

G_α — это решение, которое минимизирует целевую функцию:

$$G_\alpha = (S^T \cdot S + \alpha I)^{-1} S^T \cdot C, \quad (9)$$

где S — матрица чувствительности и I — единичная матрица.

В уравнении (9) после того, как значение параметра регуляризации определено, можно проводить восстановление ЭЕТ-изображения. Качество тихоновской регуляризации сильно зависит от α . Чаще всего его определяют специальным методом. Однако существуют некоторые подходы к выбору оптимального параметра, такие как перекрестные валидации или эмпирическая стратегия [21]. В нашем случае для простоты мы выбрали первое решение, т.е. эмпирическое определение.

3.3. Алгоритм регуляризации Ландвебера

Алгоритм Ландвебера — это метод, позволяющий эффективно решать обратную задачу с некорректной постановкой, который основан на методе крутого спуска и выбирает направление отрицательного градиента в качестве направления итерации. В данной работе используются два итерационных метода: итерационный метод, основанный на ЛОП-алгоритме [22], и итерационный метод, основанный на алгоритме Тихонова. Формулы конкретных итеративных алгоритмов могут быть выражены соответственно следующим образом:

$$\begin{cases} G_{k+1} = G_k + aS^T(C - SG_k) \\ G_0 = S^T C \end{cases}, \quad (10)$$

где a — количество итераций; G_k — нормализованное значение оттенков серого цвета изображения при k итерациях; G_0 — начальная величина шкалы изображения в оттенках серого, полученная с помощью ЛОП-алгоритма:

$$\begin{cases} G_{k+1} = G_k + aS^T(C - SG_k) \\ G_0 = (S^T S + \alpha I)^{-1} S^T C \end{cases}, \quad (11)$$

где α — параметр регуляризации, в данном уравнении G_0 — начальная величина шкалы изображения в оттенках серого, полученная с помощью алгоритма Тихонова [23, 24].

3.4. Метод адаптивного взвешенного слияния на основе изображений вращающихся электродов

Схема вращения электрода в данной работе показана на рис. 1, где электродный датчик проворачивается 4 раза на угол 6° каждый раз. С помощью этого метода можно получить 5 различных наборов данных о емкости, а затем 5 различных изображений путем решения обратных задач соответственно. Затем для слияния изображений используется метод адаптивного взвешивания, который определяет весовой коэффициент слияния изображений в соответствии с распределением энергии областей для каждого изображения.

Шаг 1. Во-первых, 5 восстановленных изображений, полученных с помощью ЛТ-алгоритма, преобразуются в одномерные векторы, обозначаемые как G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 , а затем рассчитывается ковариационная матрица X :

$$X = COV([G_1, G_2, G_3, G_4, G_5]). \quad (12)$$

Шаг 2. Согласно характеристическому уравнению $|\lambda I - X| = 0$, получают собственные значения $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$ и собственный вектор $(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5)$ матрицы X .

Шаг 3. Выбирается максимум собственных значений $\lambda_i = \max(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$, а затем рассчитываются весовые коэффициенты $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ и θ_5 :

$$\theta_1 = \frac{e_i(1,i)}{\sum_{j=1}^5 e(j,i)}, \quad \theta_2 = \frac{e_i(2,i)}{\sum_{j=1}^5 e(j,i)}, \quad \dots, \quad \theta_5 = \frac{e_i(5,i)}{\sum_{j=1}^5 e(j,i)}, \quad (13)$$

где i принимает значения в диапазоне от 1 до 5; e_i — собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению λ_i :

$$G_f(x, y) = \sum_{i=1}^5 \theta_i G_i(x, y). \quad (14)$$

Изображение слияния $G_f(x, y)$ может быть получено по (14), где $G_i(x, y)$ — изображения, полученные вращением электродов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Результаты применения алгоритмов восстановления изображения

Для того чтобы выбрать оптимальный алгоритм восстановления изображения при анализе метода слияния изображений вращающихся электродов, были проанализированы характеристики восстановления изображений ЛОП-алгоритма, алгоритма Тихонова, алгоритма Ландвебера и алгоритма Ландвебера, основанного на Тихонове (ЛТ-алгоритм). Анализ восстановления изображений был реализован в программе MATLAB, а тестирование изображений проводилось на 4 моделях, представленных на рис. 4.

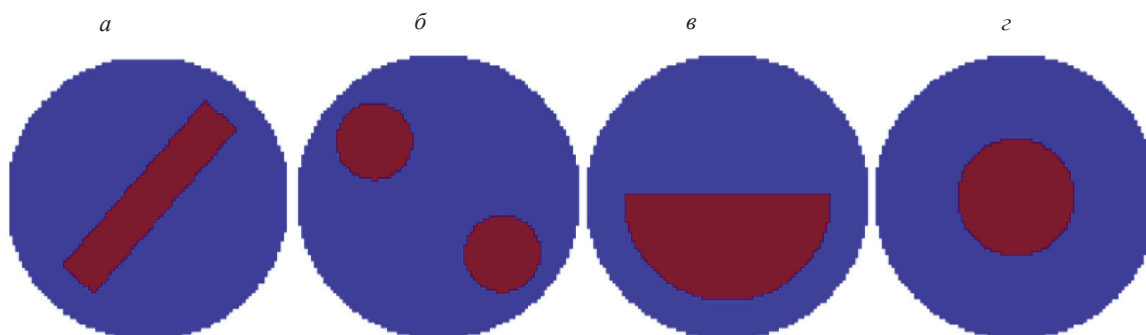


Рис. 4. Распределение диэлектрической проницаемости дефектов в виде: прямоугольника (а); двух окружностей (б); полукруга (в); круга (г).

Для алгоритма Ландвебера величина шага итерации равна 10, параметр регуляризации алгоритма Тихонова установлен на 0,25. Для ЛТ-алгоритма размер шага итерации и параметр регуляризации установлены на 10 и 0,18 соответственно. Затем область измерения 4 дефектов, из-за которых перераспределяется диэлектрическая проницаемость (дефект А, дефект В, дефект С и дефект D) была разделена на $88 \times 88 = 7744$ пикселей. Материал с низкой диэлектрической проницаемостью в области измерения датчика был установлен на воздух со значением 1,0. В качестве материала с высокой проницаемостью использовалось дерево со значением 3,0. Результаты восстановления изображений показаны на рис. 5.

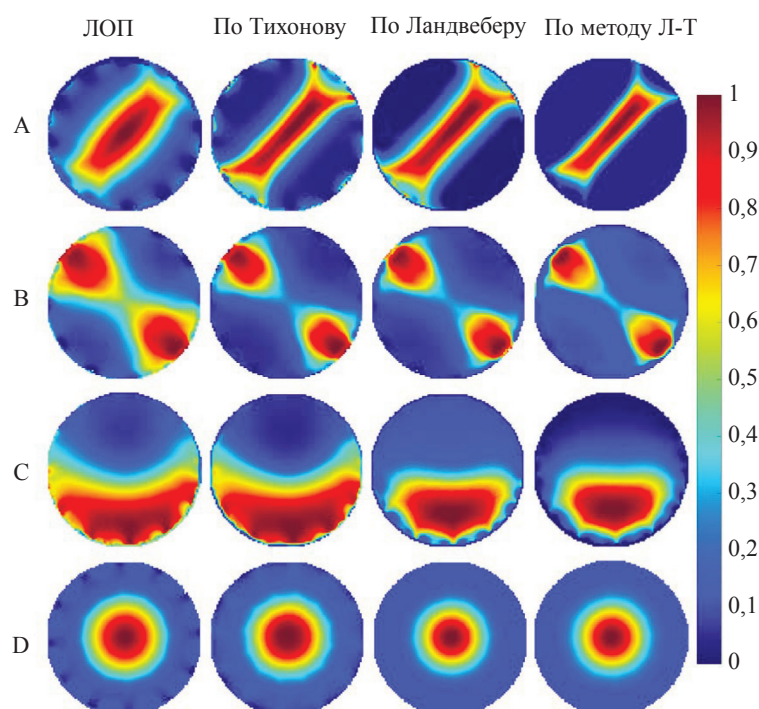


Рис. 5. Результаты восстановления изображения изображений для четырех алгоритмов.

Для оценки качества восстановленных изображений с помощью вышеуказанных 4 алгоритмов в качестве параметров оценки используются искажение изображения и коэффициент корреляции изображения. Формулы для расчета искажения изображения E_r и коэффициента корреляции p приведены в (15) и (16) соответственно:

$$E_r = \frac{\|\hat{g} - g\|}{\|g\|}; \quad (15)$$

$$p = \frac{\sum_{i=1}^P (g_i - \bar{g})(\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^P (g_i - \bar{g})^2 \sum_{i=1}^P (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})^2}}, \quad (16)$$

где $\hat{g}$ — рассчитанное распределение диэлектрической проницаемости; g — истинное распределение диэлектрической проницаемости; g_i и $\hat{g}_i$ — i -компоненты g и $\hat{g}$ соответственно; $\bar{g}$ и $\bar{\hat{g}}$ — средние величины g и $\hat{g}$ соответственно; P — количество пикселей в области отображения. С помощью уравнений можно обнаружить, что, чем меньше E_r и чем больше p , тем лучше качество восстановления изображений посредством ЭЕТ.

Искажения изображений и коэффициенты корреляции изображений для 4 различных алгоритмов восстановления изображений приведены в табл. 1 и табл. 2 соответственно. Результаты экспериментов показывают, что при восстановлении изображения по ЛОП-алгоритму возникают ошибки, связанные со значительным сглаживанием и размытием краев, а искажение изображений велико и максимальное значение составляет 31,4 %. По сравнению с ЛОП-алгоритмом, искажение изображения по алгоритму Тихонова уменьшилось, но эти значения все еще велики (29,2 %) для дефекта С, имеются серьезные артефакты. Алгоритмы Ландвебера и ЛТ-алгоритма дают гораздо лучшие результаты восстановления изображений, чем два предыдущих алгоритма. Из этих результатов следует, что ЛТ-алгоритм обеспечивает лучшее качество восстановления с относительно небольшим количеством артефактов, чем алгоритм Ландвебера, когда они используют одинаковый шаг итерации, равный 10. В данной работе решено выбрать ЛТ-алгоритм для восстановления изображения вращающегося электрода и анализа слияния изображений.

Таблица 1

Искажения изображений E_r , %

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
ЛОП	31,4	29,8	30,1	22,4
Метод Тихонова	25,4	23,1	29,2	21,2
Метода Ландвебера	23,6	21,7	18,9	14,2
Метод ЛТ	17,1	18,8	17,4	13,6

Таблица 2

Коэффициент корреляции изображения $p(|p| \leq 1)$

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
ЛОП	0,566	0,584	0,577	0,769
Метод Тихонова	0,693	0,715	0,612	0,746
Метода Ландвебера	0,742	0,764	0,807	0,904
Метод ЛТ	0,862	0,822	0,834	0,923

4.2. Эксперимент по моделированию без шума

Предложенный метод вращения датчика с 12 электродами показан на рис. 2. Пять массивов данных о емкости могут быть получены при повороте электродов 4 раза, как показано на рис. 6.

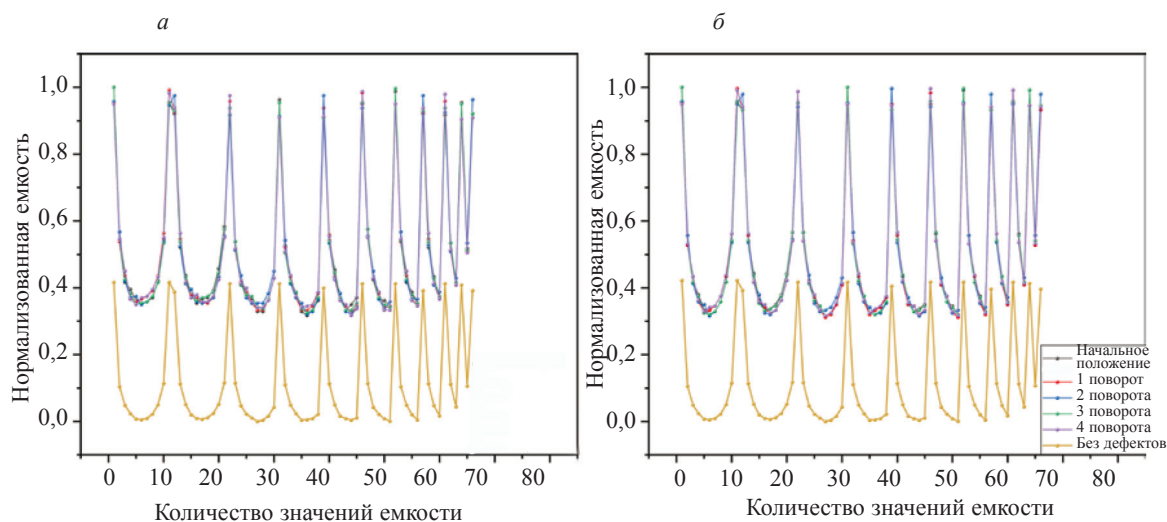


Рис. 6. График представляет собой 5 наборов данных о емкости без шумов и данных о емкости при заполнении материалом с низкой проникаемостью (без дефекта): данные емкости с дефектом А (а), данные емкости с дефектом D (б).

Затем обратная задача решается с помощью ЛТ-алгоритма и получается 5 различных восстановленных изображений. Адаптивный взвешенный метод используется для слияния 5 результатов, восстановленные изображения показаны на рис. 7. В табл. 3 и табл. 4 приведены искажения изображения и коэффициент корреляции изображения для восстановленных изображений в исходном положении и результатов адаптивного взвешенного слияния соответственно.

На рис. 6а, б представлены пять наборов бесшумных нормализованных данных емкости для дефекта А (прямоугольник), дефекта D (круг) и нормализованных данных емкости без дефекта (при заполнении материалом с низкой диэлектрической проникаемостью), соответственно. Как видно из рисунка, 5 наборов данных, полученных при вращении электродов, близки, но не идентичны, что приводит к различиям у 5 восстановленных изображений.

На рис. 7 показано, что в исходном положении, когда оба типа дефектов А и В находятся непосредственно напротив пары электродов, восстановленное изображение является

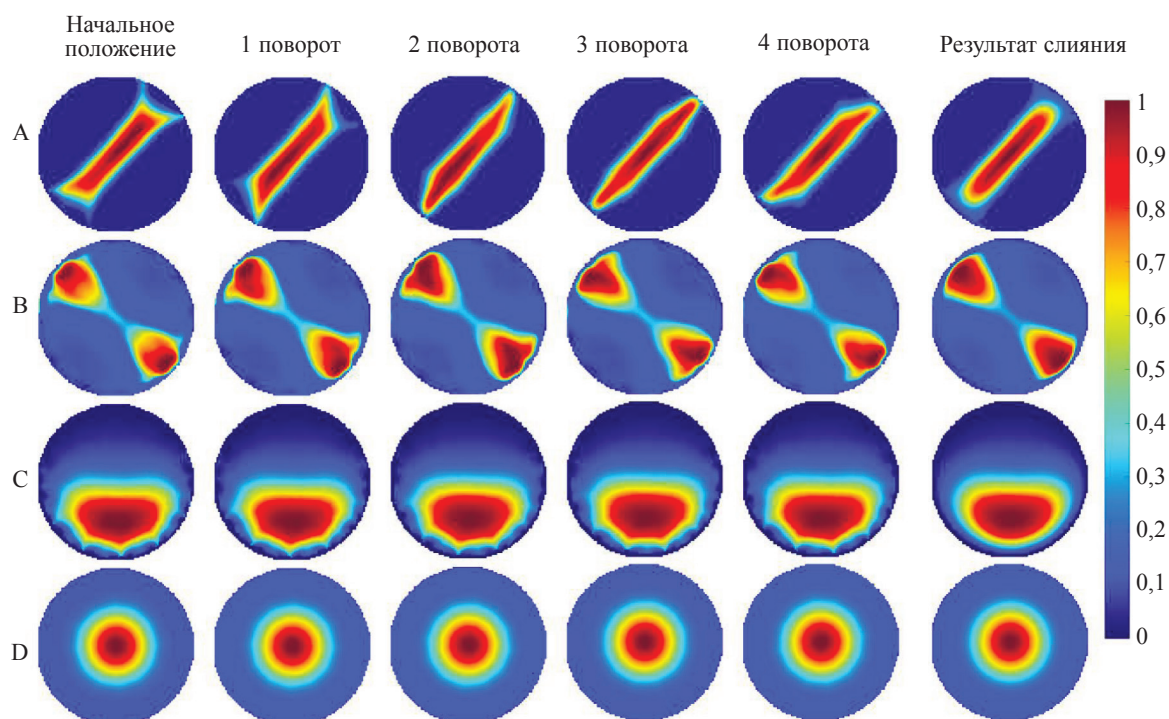


Рис. 7. Результаты восстановления изображений в случае отсутствия шумов при использовании метода вращающихся электродов.

Таблица 3

Искажение изображения E_i в исходном положении без шума и изображения слияния, %

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
Исходное положение	17,1	18,8	17,4	13,6
Результаты слияния	13,4	15,6	12,3	12,9

Таблица 4

Коэффициенты корреляции изображений r бесшумных изображений в исходном положении и изображений слияния ($|r| \leq 1$)

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
Исходное положение	0,862	0,822	0,834	0,923
Результаты слияния	0,938	0,866	0,934	0,936

наилучшим. Однако найти оптимальное положение электродов во время реальных измерений практически невозможно. Восстановленные изображения дефектов А и В при первом и четвертом поворотах почти симметричны. Согласно результатам эксперимента, на восстановленных изображениях дефектов А и В наблюдаются регулярные артефакты при изменении положения электродов во время их вращения. Из распределения электрического поля вращающихся электродов на рис. 2 видно, что прямоугольный дефект имеет наибольшее измеренное значение для пар электродов ЕЗ—Е9, когда прямоугольный дефект находится напротив пары электродов. При обратном вращении электродов значения емкости электродных пар ЕЗ—Е9 постепенно уменьшаются, а значения емкости электродных пар Е4—Е10 постепенно увеличиваются. Когда прямоугольный дефект расположен в середине электродных пар ЕЗ—Е9 и Е4—Е10 (поворот электродов на 15°), данные по емкости, измеренные для обеих электродных пар, практически одинаковы. Таким образом, разброс измерений между соседними парами электродов является основной причиной артефактов на дефектах А и В. На восстановленном изображении дефекта С артефакты наблюдаются только по краям вблизи электродов при всех вращениях. Для сравнения восстановленных изображений дефектов А, В и С в качестве контрольной группы используется дефект D. Дефект D (круг) является полностью симметричной моделью, независимо от того, как вращаются электроды, влияние положения электродов на этот дефект невелико, и можно получить пять приблизительно одинаковых восстановленных изображений. Из рис. 7 и табл. 3 и 4 видно, что качество восстановленных изображений после адаптивного взвешенного слияния улучшается для выбранных 4 дефектов. Из-за низкой чувствительности центральной области датчика качество восстановленного изображения дефекта D после адаптивного взвешенного слияния улучшается незначительно.

4.3. Модельное исследование с учетом шумов

Для оценки эффективности адаптивного метода слияния взвешенных изображений на основе вращающихся электродов в случае наличия помех 10 % шума емкости были заданы для моделирования измеряемой емкости, эти данные представлены на рис. 8. Видно, что разница между 5 наборами данных емкости с шумовым загрязнением увеличивается.

Восстановленные изображения по методу ЛТ-алгоритма и результаты слияния показаны на рис. 9, значения соответствующих параметров E_i и r перечислены в табл. 5 и 6. Результаты экспериментов показывают, что качество восстановленных изображений при использовании ЛТ-алгоритма уменьшается и больше артефактов проявляются в случае с 10%-шумом. Однако после слияния восстановленных изображений количество артефактов уменьшается и качество изображений повышается. Метод слияния изображений, основанный на вращающихся электродах, обладает высокой способностью подавления шумов, смягчает некорректность постановки задачи и позволяет получить лучшую точность определения формы.

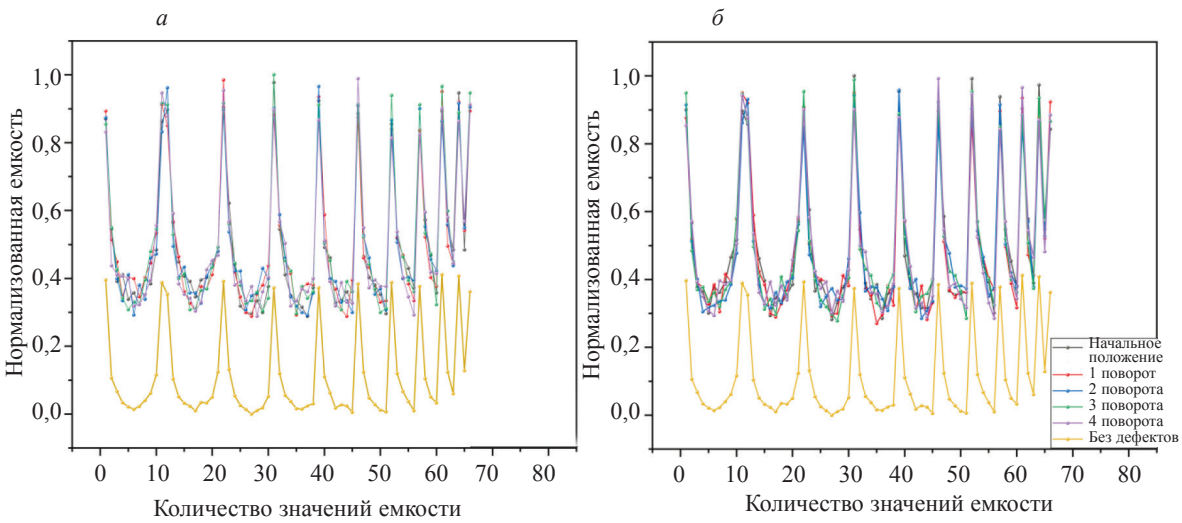


Рис. 8. График состоит из 5 наборов данных емкости при наличии шумов и данных емкости при заполнении материалом с низкой проницаемостью (без дефекта): данные о емкости с дефектом А с 10 % шумом (а); данные о емкости с дефектом D с 10 % шумом (б).

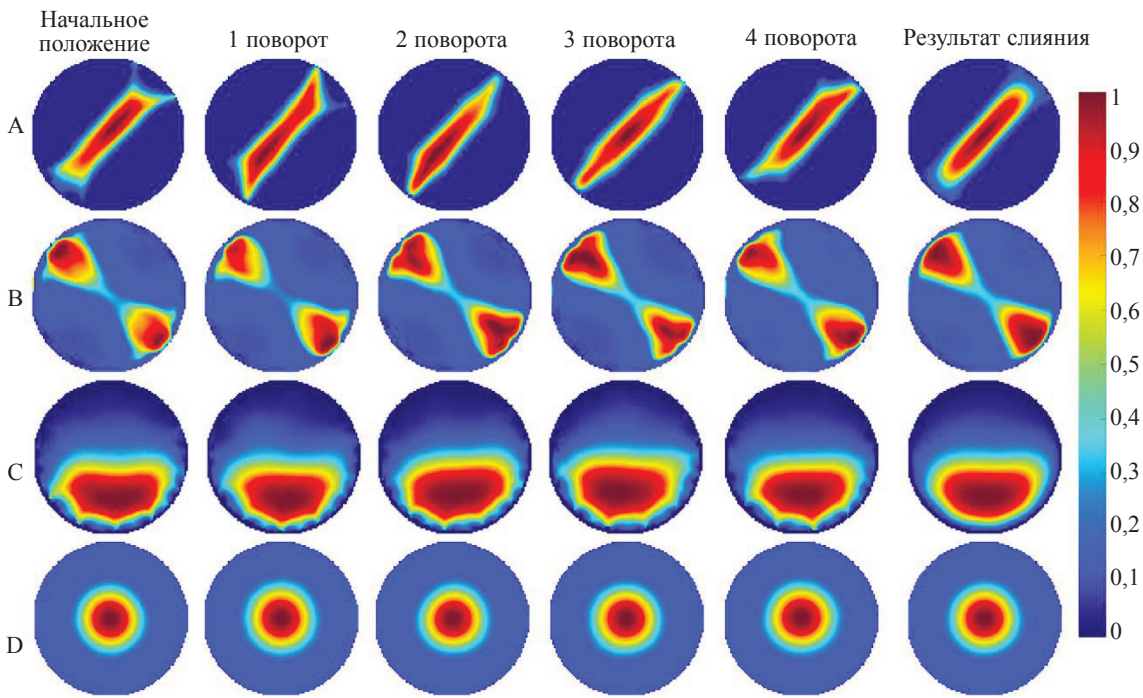


Рис. 9. Результаты восстановления изображений в случае зашумления изображения при использовании метода вращающихся электродов.

Таблица 5

Искажение изображений E_c , загрязненных шумом, в исходном положении и изображений слияния, %				
	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
Исходное положение	18,3	19,2	18,8	14,1
Результаты слияния	14,3	15,9	12,6	13,3

Коэффициенты корреляции изображений p , загрязненных шумом, в исходном положении и изображений слияния ($|p| \leq 1$)

	Дефект А	Дефект В	Дефект С	Дефект D
Исходное положение	0,834	0,813	0,815	0,914
Результаты слияния	0,921	0,852	0,928	0,931

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предлагается метод неразрушающего контроля для томографии электрической емкости, основанный на восстановлении изображений вращающихся электродов. Пять наборов данных о емкости можно получить, поворачивая электроды 4 раза (по 6° каждый раз). Были использованы четыре алгоритма восстановления изображений, и наилучшие результаты восстановления показал итерационный алгоритм Ландвебера на основе метода Тихонова. С помощью этого алгоритма было получено пять восстановленных изображений вращающихся электродов. После этого пять изображений были обработаны в соответствии с правилом адаптивного взвешенного слияния.

Сравнивая полученное после слияния изображение с изображением в исходном положении, мы видим, что качество изображения значительно улучшилось, а большинство артефактов уменьшилось. Среди них наиболее значительно улучшилось качество восстановленного изображения дефекта С E_r , уменьшился с 17,4 до 12,3 % p увеличился с 0,834 до 0,934. Затем, чтобы продемонстрировать способность нашего метода противодействовать шуму, были протестированы данные о емкости с 10-процентным шумовым загрязнением, результаты по-прежнему демонстрируют хорошее качество после слияния изображений. В случае загрязнения шумом качество восстановленного изображения дефекта С улучшается более очевидно, E_r уменьшается с 18,8 до 12,6%, а p улучшается с 0,815 до 0,931.

Этот метод эффективно компенсирует некорректность визуализации системы ЭЕТ и повышает точность определения формы дефекта объекта. Он имеет большой потенциал для применения при контроле слоев седиментации, концентрации твердых частиц и дефектов внутри объектов.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (62104052), Фондом естественных наук провинции Гуанси (2021GXNSFBA196088), Фондом научных исследований Департамента образования Гуанси (2021KY0345), Стартовым фондом научных исследований Гуансийского научно-технического университета (21Z03), Ключевой лабораторией микроволновой связи и микро-нанофотоэлектрических технологий колледжей и университетов Гуанси.

Конфликт интересов при подаче данной рукописи отсутствует, рукопись одобрена всеми авторами для публикации. Ответственный автор хотел бы заявить от имени своих соавторов, что описанная работа является оригинальным исследованием, которое не было опубликовано ранее и не находится на рассмотрении для публикации в другом месте полностью или частично. Все перечисленные авторы одобрили прилагаемую работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ismail I., Gamio J., Bukhari S.A., Yang W. Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry // Flow measurement and instrumentation. 2005. V. 16. P. 145—155.
2. Hosseini M., Kaasinen A., Aliyari Shoorehdeli M., Link G., Lähivaara T., Vauhkonen M. System identification of conveyor belt microwave drying process of polymer foams using electrical capacitance tomography // Sensors. 2021. V. 21. P. 7170.
3. Gunes C., Chowdhury S., Marashdeh Q.M., Teixeira F.L. Displacement-current phase tomography and electrical capacitance tomography for air-water flow systems / In Proceedings of the 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). IEEE. 2017. P. 1—3.
4. Rimpiläinen V., Poutiainen S., Heikkinen L.M., Savolainen T., Vauhkonen M., Ketolainen J. Electrical capacitance tomography as a monitoring tool for high-shear mixing and granulation // Chemical Engineering Science. 2011. V. 66. P. 4090—4100.
5. Wang A., Marashdeh Q., Motil B.J., Fan L.S. Electrical capacitance volume tomography for imaging of pulsating flows in a trickle bed // Chemical Engineering Science. 2014. V. 119. P. 77—87.

6. *Rasel R.K., Zuccarelli C.E., Marashdeh Q.M., Fan L.S., Teixeira F.L.* Toward multiphase flow decomposition based on electrical capacitance tomography sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2017. V. 17. P. 8027—8036.
7. *Rymarczyk T., Kłosowski G., Kozłowski E.* A non-destructive system based on electrical tomography and machine learning to analyze the moisture of buildings // *Sensors*. 2018. V. 18. P. 2285.
8. *Zhang L., Dai L.* Image reconstruction of electrical capacitance tomography based on an efficient sparse Bayesian learning algorithm // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. V. 71. P. 1—14.
9. *Lei J., Liu S., Wang X., Liu Q.* An image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography based on robust principle component analysis // *Sensors*. 2013. V. 13. P. 2076—2092.
10. *Deabes W., Abdel-Hakim A.E., Bouazza K.E., Althobaiti H.* Adversarial resolution enhancement for electrical capacitance tomography image reconstruction // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 3142.
11. *Niderla K., Rymarczyk T., Sikora J.* Manufacturing planning and control system using tomographic sensors // *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2018. V. 8. P. 29—34.
12. *Peng L., Ye J., Lu G., Yang W.* Evaluation of effect of number of electrodes in ECT sensors on image quality // *IEEE Sensors Journal*. 2011. V. 12. P. 1554—1565.
13. *Huang C.N., Yu F.M., Chung H.Y.* Rotational electrical impedance tomography // *Measurement Science and Technology*. 2007. V. 18. P. 2958.
14. *Frounchi J., Bazzazi A.* High resolution rotary capacitance tomography system / In *Proceedings of the Proc. 3rd World Congress on IPT (Banff, Canada)*. 2003. P. 858—63.
15. *Murphy S.C., York T.A.* Electrical impedance tomography with non-stationary electrodes // *Measurement Science and Technology*. 2006. V. 17. P. 3042.
16. *Liu Z., Babout L., Banasiak R., Sankowski D.* Effectiveness of rotatable sensor to improve image accuracy of ECT system // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2010. V. 21. P. 219—227.
17. *Wajman R., Banasiak R., Babout L.* On the use of a rotatable ect sensor to investigate dense phase flow: A feasibility study // *Sensors*. 2020. V. 20. P. 4854.
18. *Guo Z.* New normalization method of imaging data for electrical capacitance tomography / In *Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*. IEEE. 2011. P. 1126—1130.
19. *Mou C.H., Peng L.H., Yao D.Y., Zhang B.F., Xiao D.Y.* A calculation method of sensitivity distribution with electrical capacitance tomography // *Chinese Journal of Computational Physics*. 2006. V. 23. P. 87.
20. *Jing L., Liu S., Zhihong L. et al.* An image reconstruction algorithm based on the extended Tikhonov regularization method for electrical capacitance tomography // *Measurement*. 2009. V. 42. P. 368—376.
21. *Qi-Nian J., Zong-Yi H.* On an a posteriori parameter choice strategy for Tikhonov regularization of nonlinear ill-posed problems // *Numerische Mathematik*. 1999. V. 83. P. 139—159.
22. *Yang W., Spink D., York T., McCann H.* An image-reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical-capacitance tomography // *Measurement Science and Technology*. 1999. V. 10. P. 1065.
23. *Yang W., Peng L.* Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography // *Measurement Science and Technology*. 2002. V. 14. P. R1.
24. *Xie M., Yang H., Zhao K., Yuan B., Li J., Liu J., Ying J., Huang Y., Ou J.* Regularization parameter optimization based on the constraint of Landweber algorithm for electrical capacitance tomography // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019. V. 69. P. 101620.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА И БИБЛИОТЕКИ OpenGL

© 2024 г. С.А. Золотарев^{1,*}, А.Т. Таруат^{2,**}

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси,
Республика Беларусь 220072 Минск, ул. Академическая, 16

²Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь 220013 Минск,
пр-т Независимости, 65

E-mail: *sergei.zolotarev@gmail.com; ** ahmedtharwat6773@gmail.com

Поступила в редакцию 16.04.2024; после доработки 06.05.2024

Принята к публикации 07.05.2024

Создание быстрых параллельных итерационных статистических алгоритмов на основе использования графических ускорителей является важной и актуальной задачей, имеющей большое научное и практическое значение. Рассматривается алгоритм, основанный на методе максимизации математического ожидания максимального правдоподобия (maximum likelihood expectation maximization MLEM). MLEM является численным методом определения оценки максимального правдоподобия и, начиная с его первого применения в области реконструкции изображений в 1982 г., остается одним из наиболее популярных статистических методов реконструкции изображений, являясь фундаментом для многих других подходов. Предложена оригинальная версия параллельного алгоритма MLEM, которая обеспечивает глобальную сходимость итерационного алгоритма. Для распараллеливания алгоритма используется метод текстурных отображений при помощи графической библиотеки OpenGL. Параллельный алгоритм описан максимально подробно. Приведены примеры нескольких реконструкций изображений изделий алюминиевого литья. Полученный результат можно применить для неразрушающего контроля различных промышленных изделий, в том числе для контроля литейных изделий

Ключевые слова: итерационные методы, реконструкция изображений, томография, статистическая реконструкция изображений, сходимость итераций, графический процессор, текстурные отображения.

PARALLEL IMAGE RECONSTRUCTION USING THE MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD USING A GRAPHICS PROCESSOR AND THE OpenGL LIBRARY

© 2024 С.А. Zolotarev^{1,*}, А.Т. Taruat^{2,**}

¹Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University,
65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus

E-mail: *sergei.zolotarev@gmail.com; ** ahmedtharwat6773@gmail.com

The creation of fast parallel iterative statistical algorithms based on the use of graphics accelerators is an important and urgent task of great scientific and practical importance. An algorithm based on the method of maximizing the mathematical expectation of maximum likelihood (maximum likelihood expectation MLEM) is considered. MLEM is a numerical method for determining maximum likelihood estimates and, since its first application in the field of image reconstruction in 1982, remains one of the most popular statistical methods of image reconstruction, being the foundation for many other approaches. A new version of the MLEM parallel algorithm is proposed, which provides global convergence of the iterative algorithm. To parallelize the algorithm, the texture mapping method is used using the OpenGL graphics library. The parallel algorithm is described in as much detail as possible. Examples of several reconstructions of images of aluminum casting products are given. The obtained result can be used for non-destructive testing of various industrial products, including testing of foundry products.

Keywords: iterative methods, image reconstruction, tomography, statistical image reconstruction, iteration convergence, graphics processor, texture mapping.

DOI: 10.31857/S0130308224060036

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство используемых на практике методов томографии основаны на использовании стандартного метода фильтрованных обратных проекций ФБР (см., например, [1]). В компьютерной томографии набор исходных рентгеновских проекций может быть неполным, а угол обзора контролируемого объекта далеко не всегда является всесторонним (круго-

вым). В таких случаях алгоритмы, основанные на интегральных преобразованиях, уже не работают и необходимо использовать итерационные методы реконструкции изображений. Результирующее изображение при этом достигается методом последовательных приближений. Нетрудно убедиться в том, что итерационные алгебраические алгоритмы реконструкции изображений во многих случаях дают гораздо лучшие результаты по сравнению с традиционными вычислительными алгоритмами, основанными на методах интегральных преобразований. Сами по себе обычные последовательные итерационные алгоритмы вычислительной рентгеновской томографии являются достаточно гибкими и позволяют эффективно использовать различные способы регуляризации процесса реконструкции и использовать априорную информацию об объекте.

Отметим, что, несмотря на ряд достоинств, они имеют два существенных недостатка. Первый недостаток заключается в низкой скорости сходимости итерационного процесса, что заставляет использовать большое количество итераций и приводит к тому, что их выполнение на обычных последовательных компьютерах требует недопустимо большого времени для достижения удовлетворительного результата. Вторым недостатком является требование наличия огромного объема оперативной памяти компьютера, предназначенной для хранения вектора восстанавливаемого изображения, набора рентгеновских проекций и проекционной матрицы. То есть, как и для многих вычислительных алгоритмов, предназначенных для работы с большими объемами данных, над итерационными алгоритмами довлеет «проклятие размерности» — это значит, что указанные недостатки невероятно усугубляются с увеличением размерности восстанавливаемого изображения объекта контроля. Мы использовали в этой работе графический процессор для ускорения вычислений.

Последние два десятилетия наиболее динамично развивались именно графические процессоры (GPU). В первую очередь это было обусловлено требованиями современной компьютерной графики к повышению вычислительной мощности графических плат, необходимой для построения изображений в реальном масштабе времени. Поэтому в дальнейшем мы будем использовать GPU в качестве устройства, способного значительно ускорить выполнение процесса реконструкции изображений.

В 1994 г. Cabral [2] детально описал, как можно осуществить компьютерную томографию (основанную на методе фильтрованных обратных проекций) с помощью аппаратной поддержки текстурных отображений на основе использования GPU. Позже Mueller and Yagel [3] применили ту же самую аппаратную поддержку для итерационной реконструкции (с помощью метода SART), использующую текстурное отображение объема для прямого проецирования и обратное текстурное отображение объема для обратного проецирования. Этот подход оказался очень эффективным, так как обе этих операции можно реализовать путем использования стандартных инструкций графической библиотеки OpenGL, которая использует проективные текстуры [4] для обратного проецирования под произвольными углами.

МЕТОД МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

Группа статистических алгоритмов реконструкции принадлежит к классу итерационных методов реконструкции, также как и алгебраические методы реконструкции [5]. Статистические методы реконструкции обеспечивают различные преимущества, такие как моделирование физических эффектов и учет вероятностного распределения экспериментальных измерений. Недостатком этих методов является то, что они являются более сложными, чем детерминированные итерационные методы, и приводят к более высоким вычислительным затратам. Поэтому они в основном применяются в тех случаях, когда другие методы не могут удовлетворить требованиям к качеству реконструируемых изображений. Обычно итерационные статистические методы реконструкции широко используются в эмиссионной томографии и более редко в трансмиссионной компьютерной томографии. В 1982 г. Шепп представил статистический метод максимального правдоподобия для реконструкции в эмиссионной томографии, который вызвал значительный интерес к статистическим методам реконструкции.

В этой работе мы будем использовать статистический метод максимального правдоподобия для целей трансмиссионной томографии. Рассмотренный ниже вариант его использования основан на работе Фесслера и Ланге [6]. Более конкретно укажем, что наибольший интерес для нас представляет вариант метода максимального правдоподобия на основе выпуклой оптимизации, также предложенный в вышеуказанной работе. Другие методы статистической реконструкции подробно описаны в [7], алгебраический метод SART описан в [8]. Обратим внимание, что во многих работах используется натуральный логарифм функции правдоподобия, так называемая логарифмическая функция правдоподобия — $\log\text{-likelihood}$. В ряде слу-

чаев более удобно работать именно с ней. Так как логарифм является монотонно возрастающей функцией, то логарифмическая функция правдоподобия достигает максимума в тех же самых точках, что и функция правдоподобия (likelihood). Следовательно, логарифмическая функция правдоподобия может быть использована вместо вероятности в методе максимального правдоподобия. В трансмиссионной томографии необходимо реконструировать значения коэффициентов линейного ослабления μ_j , заданные для каждого вокселя j . Так как μ_j является вероятностью захвата фотона вокселем j , то мы имеем очевидное ограничение $\mu_j \geq 0$. Пуассоновский характер распределения сгенерированного рентгеновского излучения подразумевает, что распределения для различных проекций являются независимыми и что log-likelihood наблюдаемого количества фотонов может быть представлена как

$$L(\mu) = \sum_i \{-d_i \exp-(\mathbf{a}_i, \mu) - Y_i(\mathbf{a}_i, \mu)\} + c, \quad (1)$$

где d_i — ожидаемое количество фотонов выходящих из источника рентгеновского излучения и попадающих в i -й пиксель рассматриваемой проекции; c — несущественная константа; μ — вектор коэффициентов ослабления μ_j ; $\mathbf{a}_i$ — вектор длин пересечений луча, выходящего из источника и попадающего в i -й пиксель рассматриваемой проекции с вокселями, принадлежащими просвечиваемому объекту; $(\mathbf{a}_i, \mu)$ — скалярное произведение двух векторов, то есть $(\mathbf{a}_i, \mu) = \sum_j a_{ij} \mu_j$.

В работе [6] Ланге предложил модифицированный алгоритм для расчета логарифмической функции правдоподобия, который позволил записать в конечном виде алгоритм вычисления вектора μ , обеспечивающего минимизацию log-likelihood:

$$\mu_j^{n+1} = \mu_j^n + \mu_j^n \sum_i a_{ij} (d_i \exp-(\mathbf{a}_i, \mu^n) - Y_i) / \sum_i a_{ij} (\mathbf{a}_i, \mu^n) d_i \exp-(\mathbf{a}_i, \mu^n). \quad (2)$$

Формула (2) обеспечивает статистическое итерационное решение задачи реконструкции изображения, просвечиваемого объекта контроля.

Основными аргументами, которые показывают необходимость развития и дальнейшего исследования итерационных методов и алгоритмов, являются следующие: 1) все они без труда адаптируются для случаев с различными схемами сбора проекционных данных; 2) являются пригодными для гораздо более широкого круга разнообразных технических задач по сравнению с методами, использующих интегральные преобразования. Существует достаточно широкий перечень задач реконструкции изображений, где применение итерационных реконструктивных методов обеспечивает гораздо лучшие результаты: реконструкция объектов по ограниченному или неполному набору рентгеновских проекций; реконструкция объектов в ограниченном угловом диапазоне. Основным недостатком этих алгоритмов является относительно невысокая скорость их сходимости и значительное время, необходимое на их выполнение. Это обусловлено тем, что для получения достаточно точного решения часто приходится выполнять десятки, а иногда сотни итераций и обсчитывать очень большие двухмерные и трехмерные массивы данных. В качестве второго недостатка, ограничивающего их использование, можно привести требование наличия большого количества оперативной памяти ПК или рабочей станции, необходимой для хранения реконструируемого изображения, набора рентгеновских проекций, а также коэффициентов проекционной матрицы. Одним из способов преодоления этих проблем является использование для вычислений графических процессоров компьютеров. Итерационные методы применяются главным образом для задач очень большой размерности, которыми, как правило, являются задачи компьютерной томографии. Важно отметить, что в формуле (2) используются в качестве проекционных данных интенсивности рентгеновского излучения, не поглощенного объектом реконструкции. Эта формула может быть достаточно просто реализована для вычислений на обычном последовательном процессоре. Применение графического процессора для вычислений по этой формуле вызывает значительные трудности. Нами был разработан оригинальный алгоритм, который позволил использовать формулу (2) для вычислений на графическом процессоре. Он был проверен на нескольких наборах рентгеновских данных, в том числе и на рентгеновских проекциях с интенсивностями для алюминиевого поршня без дефектов.

Алгоритм параллельной реализации MLEM методом наложения текстур

Инициализация параллельного алгоритма MLEM

Вход:

Число проекций – **nproj**.

Выход: **Текстурная матрица matr_proj[nproj]**, предназначенная для обратного проецирования корректирующего изображения на слои трехмерной текстуры с изображением объекта реконструкции, трехмерное изображение объекта реконструкции, записанное в одномерном массиве **objf[dims[0]*dims[1]*dims[2]]**, где для каждого вокселя **objf** задано начальное значение линейного коэффициента ослабления трехмерного изображения объекта реконструкции.

Порядок выполняемых шагов для инициализации:

1. С помощью функции библиотеки OpenGL **glGenTextures(1,&g_dynamicTextureID)** создаем динамическую текстуру для буфера кадра.
 2. С помощью функции библиотеки OpenGL **glGenFramebuffers(1, &g_frameBuffer)** создаем буфер кадра.
 3. С помощью функции библиотеки OpenGL **glGenTextures(2, texName)** создаем две текстуры, предназначенные для перемножения двухмерных текстур.
 4. Создаем помощью функции библиотеки OpenGL **glTexImage3D()** трехмерную текстуру, предназначенную для хранения изображения объекта реконструкции.
glTexImage3D(GL_TEXTURE_3D,0, GL_LUMINANCE32F_ARB, (dims[0], dims[1], dims[2], 0, GL_LUMINANCE, GL_FLOAT, (GLfloat *)objf).
 5. Создаем с помощью вызова специально написанной функции **loadImageTexture()** проективную текстуру **g_sloj_object**.
 6. Рассчитываем координаты углов для горизонтальных и вертикальных слоев трехмерной текстуры, содержащей изображение реконструируемого объекта.
 7. Создаем текстурную матрицу **matr_proj[nproj]**, предназначенную для обратного проецирования корректирующего изображения на слои трехмерной текстуры с изображением объекта реконструкции. Для этого используем специально написанную подпрограмму на языке Си: **Init_Proj_Texture(nproj)**.
-

Реализация параллельного алгоритма MLEM:

Вход: Число итераций **kmax**, Число проекций — **nproj**, расстояние от источника излучения до точки вращения **sourdreh**, сами проекции **P_l** с размерностями по осям ***O_X*** и ***O_Y***, равными **size_x** и **size_y**, задаются в виде одномерных массивов, **lambda** — параметр релаксации, дискретизированное начальное трехмерное изображение объекта реконструкции с размерностями по осям ***O_X***, ***O_Y*** и ***O_Z*** — **dims[0]**, **dims[1]** и **dims[2]**, представленное в виде одномерного массива **objf**,

alfa[nproj] — массив, содержащий проекционные углы, под которыми источник излучения просвечивает объект для получения соответствующей заданному угловому направлению проекции, массив **matr_proj[nproj]** — содержит заранее рассчитанные текстурные матрицы для каждой проекции, предназначенные для обратного проецирования корректирующего изображения на слои трехмерной текстуры.

Выход: Трехмерное изображение объекта реконструкции **objf** с рассчитанными значениями линейного коэффициента ослабления, записанное в одномерном массиве **objf[dims[0]*dims[1]*dims[2]]**.

Порядок выполняемых шагов для реконструкции изображения:

1. Осуществляем внешний цикл **for (k=0; k <kmax;k++)** по числу итераций **kmax**.
2. Открываем внутренний цикл **for (l=0; l<nproj;l++)** по числу проекций **nproj**.
3. Считываем поочередно проекции с интенсивностями, непоглощенного объектом реконструкции, рентгеновского излучения. Для чтения файлов с проекциями используем стандартную функцию
fread(void *restrict buffer, size_t size, size_t count, FILE *restrict stream).
4. Выполняем команду для задания режима смешивания цветов **glBlendEquation()**.
5. Создаем матрицу проецирования для пирамиды симметричного перспективного вида.
gluPerspective((GLfloat)angl_y, aspect, 1.0, 16000000.0) и умножаем на нее текущую матрицу.

6. Осуществляем проецирование горизонтальных слоев трехмерной текстуры с изображением объекта в буфер кадра. Сначала для диапазона проекционных углов ($\alpha[l] \geq 0.0$ & $\alpha[l] \leq \pi/4.0$) || ($\alpha[l] \geq (3.0 * \pi/4.0)$ & $\alpha[l] \leq (\pi + \pi/4.0)$) || ($\alpha[l] \geq (3.0 * \pi/2.0 + \pi/4.0)$ & $\alpha[l] \leq 2.0 * \pi$) проецируем слои трехмерной текстуры, расположенные вдоль оси аппликат. В противном случае проецируем перпендикулярные к ним слои, расположенные вдоль оси абсцисс.

7. С помощью функции смещения цветов **glColor4f()** умножаем все слои на коэффициент $1.0 / \text{fabs}(\cos(\alpha[l]))$: либо $1.0 / \text{fabs}(\sin(\alpha[l]))$ в зависимости от диапазона проекционных углов.

8. После проецирования всех слоев считываем текущую смоделированную проекцию с лучевыми суммами из буфера кадра в одномерный массив **image2[]**

glReadPixels(0,0, ws,hs, GL_LUMINANCE, GL_FLOAT, image2).

9. Производим расчет модельной проекции с интенсивностями и вычисляем ее невязку с экспериментальной проекцией с интенсивностями.

10. Производим формирование корректирующего изображения **image3**.

11. Записываем корректирующее изображение в проективную текстуру

glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, g_sloj_object);

glTexSubImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, 0, 0, size_x, size_y, GL_LUMINANCE, GL_FLOAT, image3).

12. Завершаем прямое проецирование.

13. Начинаем обратное проецирование:

ортогонально поочередно проецируем горизонтальные слои трехмерной текстуры, содержащей трехмерное изображение объекта реконструкции в буфер кадра.

14. Копируем содержимое буфера кадра в двумерную текстуру, предназначенную для перемножения со текстурой, содержащей корректирующее изображение

glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, texName[0]);

glCopyTexSubImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, 0, 0, 0, 0, dims[0], dims[1]).

15. Соединяемся с текстурой, содержащей корректирующее изображение

glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, g_sloj_object).

16. Проецируем ее в буфер кадра с помощью проективного проецирования как проективную текстуру, используя для этого заранее рассчитанные текстурные матрицы **matr_proj[nproj]**.

17. Копируем содержимое буфера кадра в текстуру, предназначенную для перемножения с текстурой, содержащей изображение текущего горизонтального слоя объекта реконструкции

glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, texName[1]);

glCopyTexSubImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, 0, 0, 0, 0, dims[0], dims[1]).

18. Производим одновременное наложение двух двумерных текстур с изображениями текущего слоя объекта и корректирующим изображением с помощью функции **glMultiTexCoord2f()**.

19. Замещаем в трехмерной текстуре текущий горизонтальный k-й слой скорректированным слоем

glCopyTexSubImage3D(GL_TEXTURE_3D, 0, 0, 0, k, 0, 0, dims[0], dims[1]).

20. Заканчиваем цикл по горизонтальным слоям трехмерной текстуры. Заканчиваем обратное проецирование и коррекцию трехмерной текстуры с изображением объекта реконструкции. Заканчиваем цикл для числа проекций **nproj**

for (**l**=0; **l**<**nproj**; **l**++) и переходим к следующей итерации.

21. Если (**k** < **kmax**),

то переходим на следующую итерацию цикла for (**k**=0; **k** < **kmax**; **k**++),

иначе заканчиваем цикл по числу итераций.

Следует заметить, что на шаге 21 алгоритма возможен досрочный выход из цикла по числу проекций. На каждом шаге цикла по числу итераций рассчитывается невязка между экспериментальными и модельными данными $\delta = \|p - Ax\|$. Если скорость уменьшения уровня невязки становится меньше, чем 3 процента, то происходит досрочный выход из цикла, согласно условию, если $\frac{(\delta_k - \delta_{k-1}) / \delta_{k-1}}{100} \leq 3$, то выходим из цикла.

В [9] рассматривалось ускорение популярных итерационных алгоритмов томографической реконструкции на обычных графических видеокартах для ПК. Описанный выше параллельный алгоритм значительно отличается от параллельных алгоритмов **MLEM**, описанных в работах других исследователей.

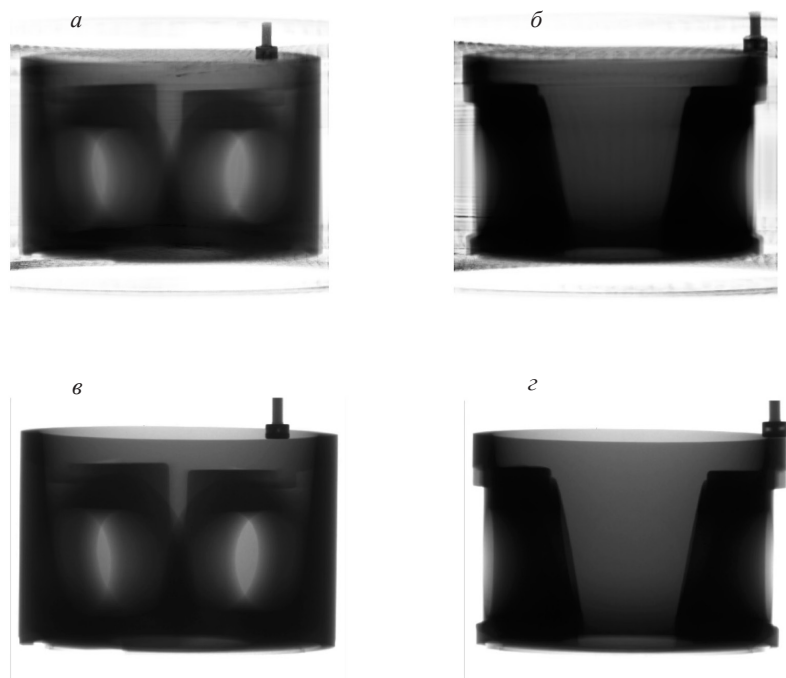


Рис. 1. Модельные (*а, б*) и экспериментальные (*в, г*) рентгеновские проекции алюминиевого поршня для углов сканирования 45° (*а, в*) и 90° (*б, г*).

Различие заключается в том, что для коррекции трехмерного изображения реконструируемого объекта они использовали проекции с лучевыми интегралами (см., например, [10—12]). Аналогично в работе [13] использовалась невязка для лучевых интегралов. Мы применили невязку между экспериментальными и смоделированными проекциями с интенсивностями, не поглощенного объектом контроля рентгеновского излучения. Этот алгоритм показал хорошее быстроедействие и практически не уступает параллельному алгоритму SART, описанному нами в [14, 15]. Учет априорной информации может быть осуществлен так же, как в [16—18]. На рис. 1 показаны модельные и экспериментальные рентгеновские проекции алюминиевого поршня с интенсивностями для углов сканирования 45° и 90° .

Схожесть модельных и экспериментальных проекций является подтверждением адекватности реконструкции по рентгеновским проекциям с интенсивностями не поглощенного объектом рентгеновского излучения. На рис. 2 показаны перспективные виды реконструированного трехмерного изображения поршня.

Рассмотрим реконструкцию изображения алюминиевой детали, которую мы исследовали ранее, но по проекциям с лучевыми интегралами. Первый набор 32 рентгеновских проекций с интенсивностями был предоставлен господином Dr. Martin Simon, сотрудником германской

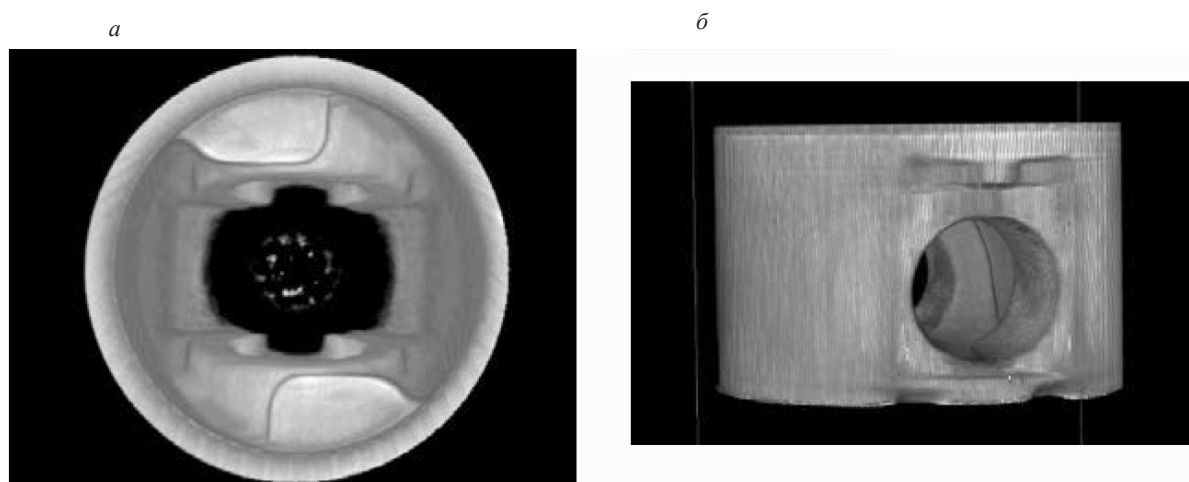


Рис. 2. Перспективные виды изображения поршня: *а* — торцевой вид поршня, *б* — фронтальный вид.

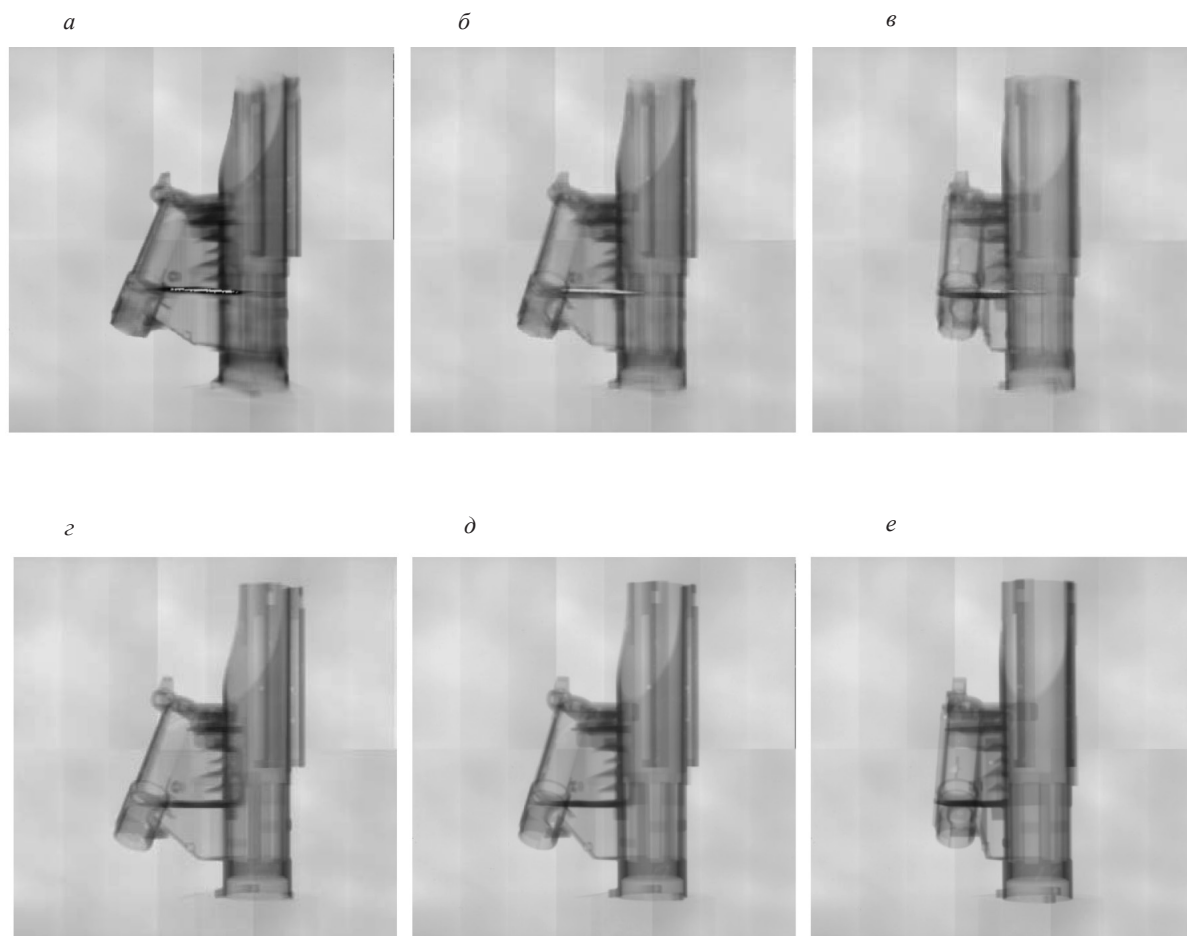


Рис. 3. Модельные (а—в) и экспериментальные (г—е) рентгеновские проекции алюминиевой детали для углов сканирования 11,25° (а, г), 45° (б, д) и 90° (в, е).

фирмы Зауэрвайн (Sauerwein). Все эти проекции были получены в угловом диапазоне 180°, т.е. при одностороннем доступе к объекту реконструкции. Число проекционных видов всего 32, причем они расположены в угловом диапазоне 180°. На рис. 3 показаны три проекции этой детали с интенсивностями для углов 11,25, 45 и 90°.

Видно, что модельные проекции достаточно близко соответствуют экспериментальным проекциям. Похож даже неоднородный фон, показывающий интенсивности рентгеновских лучей, прошедших мимо просвечиваемого объекта.

На рис. 4 показано реконструированное трехмерное изображение алюминиевой детали.

Второй набор из 2300 рентгеновских проекций был предоставлен Иваном Георгиевым, научным сотрудником Института информационных и коммуникационных технологий (ИИКТ) Болгарской академии наук. Они были получены на промышленном томографе ХТ Н 225 фирмы Nikon Metrology. Угловой шаг между проекциями был равен 0,156°. Размер пикселя равняется 0,127 мм. Разрешение матрицы детекторов 1840×1446 пикселей. Расстояние источник—детектор равно 1009,603 мм; расстояние источник—объект составляет 775,478 мм. Напряжение рентгеновской трубки $U = 120$ кВ, анодный ток $I_a = 128$ мкА. Реконструкция была осуществлена по 115 рентгеновским проекциям, выбранным из 2300 проекций через одинаковые угловые интервалы.

На рис. 5 показаны три модельные и три экспериментальные проекции с интенсивностями алюминиевого бокса для углов 3, 90 и 180°.

Видно, что модельные проекции с интенсивностями непоглощенного объектом рентгеновского излучения практически идентичны соответствующим экспериментальным проекциям, за исключением незначительного размытия внизу проекций.

Из всего вышеизложенного следует, что использование для коррекции изображения реконструируемого объекта невязки между модельными и экспериментальными проекциями с интенсивностями непоглощенного объектом рентгеновского излучения обеспечивает правильную внутреннюю структуру реконструируемого изображения, соответствующую эксперимен-



Рис. 4. Трехмерное изображение алюминиевой детали.

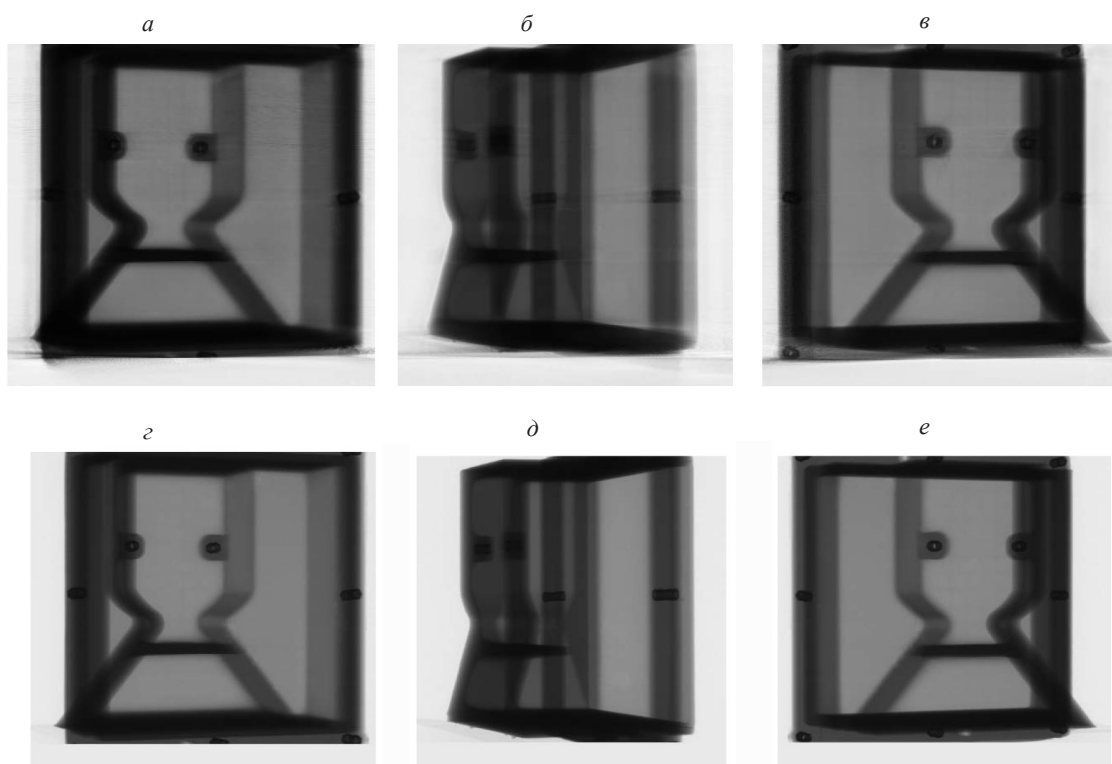


Рис. 5. Модельные (*а—в*) и экспериментальные (*з—е*) рентгеновские проекции алюминиевого бокса для углов сканирования 3° (*а, з*), 90° (*б, д*) и 180° (*в, е*).

тальным проекциям. Преимущество использования проекций с интенсивностями для реконструкции изображения контролируемого объекта состоит в том, что проекции с интенсивностями сохраняют пуассоновский характер распределения фотонов, детектируемых на двумерной матрице детекторов, что позволяет использовать для коррекции пуассоновского шума известные и проверенные способы его подавления. Если мы используем для реконструкции изобра-

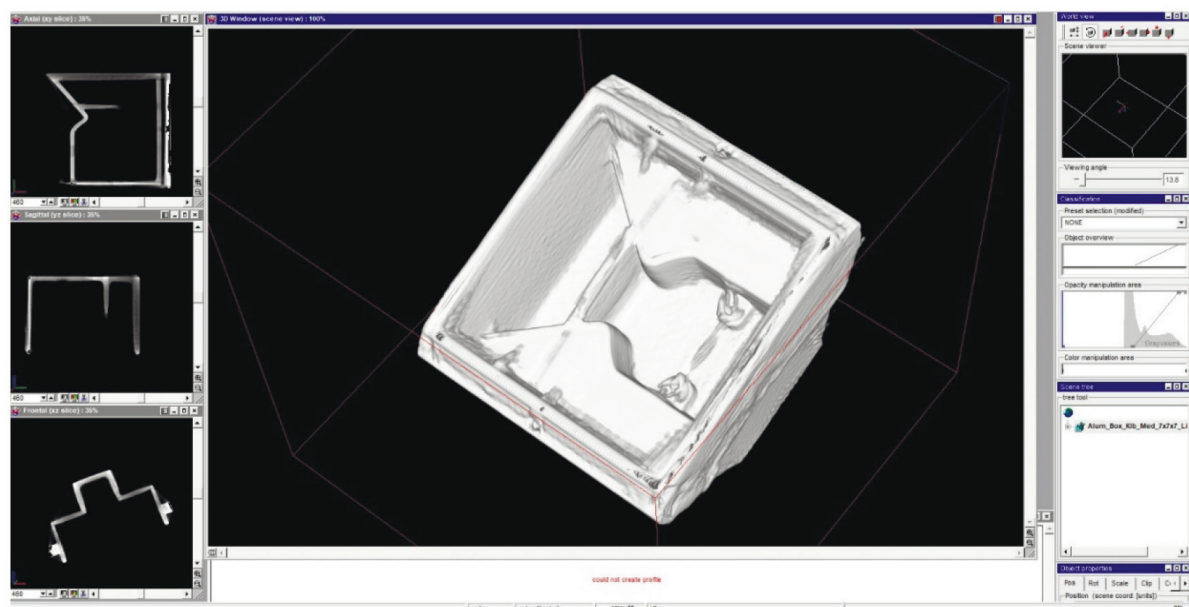


Рис. 6. Трехмерное изображение алюминиевого бокса; слева показаны его центральные ортогональные сечения.

жения проекции с лучевыми интегралами, то мы теряем информацию о статистическом характере шумов и плохо подавляем шумы с неизвестным статистическим распределением, что ухудшает качество реконструируемого изображения.

На рис. 6 показан перспективный вид изображения алюминиевого бокса.

Отметим еще, что сравнительно недавно появились и начали активно разрабатываться методы и алгоритмы реконструкции, учитывающие как динамику изменения изображений, так и изменение взаимного положения измерительной системы и объекта. В [19] задача реконструкции изображений рассматривается как задача обработки многомерных сигналов, что позволяет использовать и адаптировать для ее решения хорошо разработанные методы теории оценивания, т.е. реконструируемые изображения представляются случайными дискретными полями, для которых являются применимыми методы оценивания многомерных случайных последовательностей. В [19—24] была разработана и развита теория адаптивной рекуррентной реконструкции изображений медицинских и промышленных объектов контроля, предложена специальная методика декомпозиции ковариационной матрицы ошибок оценивания, которая позволила существенно понизить размерность алгоритма реконструкции, а также разработана теория и методика реконструкции изображений в условиях априорной неопределенности характеристик изображения и помех на основе двухэтапной процедуры адаптивного оценивания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В данной работе предложен параллельный алгоритм реконструкции изображений MLEM по проекциям с интенсивностями непоглощенного объектом рентгеновского излучения. Он показал хорошее быстродействие, не уступающее быстродействию, ранее разработанному одним из соавторов параллельного алгоритма SART [15]. Для распараллеливания вычислений использовался метод текстурных отображений, осуществляемых с помощью графической библиотеки OpenGL. Параллельная среда CUDA не использовалась. Поскольку среда CUDA предназначена для использования с графическими видеокартами от фирмы NVIDIA, мы избежали тем самым необходимости использования видеокарт одной фирмы и можем реализовывать алгоритм на видеокартах от других производителей. Это повышает мобильность и переносимость алгоритма. Важным является то, что нам удалось строго и аккуратно реализовать алгоритм, предложенный в работе [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rizo P., Grangeat P., Sire P., Lemasson P., Melennec P. Comparison of three-dimensional x-ray cone-beam reconstruction algorithms with circular source trajectories // J. Opt. Soc. Amer. 1991. V. 8. No. 10. P. 1639—1648.

2. Cabral B., Cam N., Foran J. Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware // Symposium on Volume Visualization. 1994. P. 91—98.
3. Mueller K., Yagel R., Wheller J.J. Anti-aliased 3-D cone-beam reconstruction of low-contrast objects with algebraic methods // IEEE Trans. Med. Imag. 1999. V. 18. P. 519—537.
4. Segal M., Korobkin C., van Widenfelt R., Foran J., Haeberli P.E. Fast shadows and lighting effects using texture mapping // SIGGRAPH'92. 1992. V. 26. P. 249—252.
5. Gordon R., Bender R., Herman G.T. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // J. Theor. Biol. 1970. No. 29. P. 471—481.
6. Lange K., Fessler J.A. Globally convergent algorithms for maximum a posteriori transmission tomography // Image Processing, IEEE Transactions. 1995. V. 4. No. 10. P. 1430—438.
7. De Man B., Qi J. Statistical Methods for Image Reconstruction / 2009 IEEE Nuclear Science Symposium — Short Course Documents, Orlando, FL, USA. 2009. 27 p.
8. Andersen A.H., Kak A.C. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm // Journal of Ultrasonic Imaging. 1984. V. 6. No. 1. P. 81—94.
9. Xu F., Mueller K. Accelerating popular tomographic reconstruction algorithms on commodity PC graphics hardware // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2005. V. 52. P. 654—657.
10. Gengsheng Lawrence Zeng. Maximum-Likelihood Expectation-Maximization Algorithm vs. Windowed Filtered Backprojection Algorithm: A Case Study // Journal of nuclear medicine technology. June 2018. V. 46. No. 2.
11. Dempster A., Laird N., Rubin D. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // J. R. Stat. Soc. 1977. No. 39. P. 1—38.
12. Vardi Y., Shepp L.A., Kaufman L. A statistical-model for positron emission tomography // J. Am. Stat. Assoc. 1985. No. 80. P. 8—20.
13. Эмиссионная томография: пер. с англ. / Ред. Д. Арневальд, М. Верник. М.: Техносфера, 2009.
14. Золотарев С.А., Венгринович В.Л. Трехмерная итерационная томографическая реконструкция с использованием графических процессоров // Дефектоскопия. 2009. № 8. С. 82—94.
15. Золотарев С.А., Мирзаванд М.А. Трехмерная реконструкция методом SART с минимизацией тотальной вариации // Системный анализ и прикладная информатика. 2015. № 3. С. 31—35.
16. Золотарев С.А., Таруат А.Т., Биленко Э.Г. Итерационная реконструкция изображений алюминиевого литья с учетом априорной информации // Дефектоскопия. 2023. № 4. С. 46—55.
17. Золотарев С.А., Таруат А.Т., Биленко Э.Г. Итерационная реконструкция изображения алюминиевого корпуса с учетом априорной информации // Неразрушающий контроль и диагностика. 2023. № 1. С. 46—52.
18. Zolotarev S.A., Taruat Ahmed Talat Taufik, Bilenko E.G. Taking into account a priori information in the iterative reconstruction of images of foundry products // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. 2023. V. 68. No. 3. P. 242—251.
19. Артемьев В.М., Наумов А.О., Тиллак Г.-Р. Реконструкция динамических изображений в томографии процессов. Минск: Издательский центр БГУ, 2004. 168 с.
20. Artemiev V.M., Naumov A.O., Tillack G.-R. Adaptive image reconstruction applied to X-Ray tomography // Materialprüfung. 1998. V. 40. No. 9. P. 342—345.
21. Artemiev V.M., Naumov A.O., Tillack G.-R. Adaptive image reconstruction with predictive model // Maximum Entropy and Bayesian Methods. Eds. W. von der Linden e. a. Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 123—130.
22. Artemiev V.M., Naumov A.O., Tillack G.-R. Recursive Tomographic Image Reconstruction Using a Kalman Filter Approach in the Time Domain // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 2073—2083.
23. Artemiev V.M., Naumov A.O., Tillack G.-R. Statistical Estimation theory Approach for the Dynamic Image Reconstruction / Proc. 2nd WorldCongress on Industrial Process Tomography. Hannover, Germany, August 2001. Hannover, 2001. P. 772—779.
24. Naumov A., Khmarskiy P., Byshnev N., Piatrowski M. Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations // Engineering Applications. 2023. V. 2. No. 3. P. 243—253.

REFERENCES

1. Rizo P., Grangeat P., Sire P., Lemasson P., Melennec P. Comparison of three-dimensional x-ray cone-beam reconstruction algorithms with circular source trajectories // J. Opt. Soc. Amer. 1991. V. 8. No. 10. P. 1639—1648.
2. Cabral B., Cam N., Foran J. Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware // Symposium on Volume Visualization. 1994. P. 91—98.
3. Mueller K., Yagel R., Wheller J. J. Anti-aliased 3-D cone-beam reconstruction of low-contrast objects with algebraic methods // IEEE Trans. Med. Imag. 1999. V. 18. P. 519—537.
4. Segal M., Korobkin C., van Widenfelt R., Foran J., Haeberli P.E. Fast shadows and lighting effects using texture mapping // SIGGRAPH'92. 1992. V. 26. P. 249—252.
5. Gordon R., Bender R., Herman G.T. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // J. Theor. Biol. 1970. No. 29. P. 471—481.

6. Lange K., Fessler J.A. Globally convergent algorithms for maximum a posteriori transmission tomography // Image Processing, IEEE Transactions. 1995. V. 4. No. 10. P. 1430—438.
7. De Man B., Qi J. Statistical Methods for Image Reconstruction / 2009 IEEE Nuclear Science Symposium — Short Course Documents, Orlando, FL, USA. 2009. 27 p.
8. Andersen A.H., Kak A.C. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm // Journal of Ultrasonic Imaging. 1984. V. 6. No. 1. P. 81—94.
9. Xu F., Mueller K. Accelerating popular tomographic reconstruction algorithms on commodity PC graphics hardware // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2005. V. 52. P. 654—657.
10. Gengsheng Lawrence Zeng. Maximum-Likelihood Expectation-Maximization Algorithm vs. Windowed Filtered Backprojection Algorithm: A Case Study // Journal of nuclear medicine technology. June 2018. V. 46. No. 2.
11. Dempster A., Laird N., Rubin D. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // J. R. Stat. Soc. 1977. No. 39. P. 1—38.
12. Vardi Y., Shepp L.A., Kaufman L. A statistical-model for positron emission tomography // J. Am. Stat. Assoc. 1985. No. 80. P. 8—20.
13. Emission tomography: trans. from English / Ed. D. Arnewald, M. Wernick. M.: Tekhnosphere, 2009. In Russian
14. Zolotarev S.A., Vengrinovich V.L. Three-dimensional and iterative tomographic reconstruction using graphic processors // Defectoscopya. 2009. No. 8. P. 82—94. In Russian.
15. Zolotarev S.A., Mirzavand M.A. Three-dimensional reconstruction using the SART method with minimization of total variation // System analysis and applied informatics. 2015. No. 3. P. 31—35. In Russian.
16. Zolotarev S.A., Taruat A.T., Bilenko E.G. Iterative reconstruction of aluminum casting images taking into account a priori information // Defectoscopya. 2023. No. 4. P. 46—55. In Russian.
17. Zolotarev S.A., Taruat A.T., Bilenko E.G. Iterative reconstruction of an image of an aluminum body taking into account a priori information // Non-destructive testing and diagnostics. 2023. No. 1. P. 46—52. In Russian.
18. Zolotarev S.A., Taruat Ahmed Talat Taufik, Bilenko E.G. Taking into account a priori information in the iterative reconstruction of images of foundry products // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. 2023. V. 68. No. 3. P. 242—251.
19. Artemyev V.M., Naumov A.O., Tillak G.-R. Reconstruction of dynamic images in process tomography. Minsk: Publishing Center of BSU. 2004. 168 p. In Russian.
20. Artemiev V., Naumov A., Tillack G.-R. Adaptive image reconstruction applied to X-Ray tomography // Materialprüfung. 1998. V. 40. No. 9. P. 342—345.
21. Artemiev V.M., Naumov A.O., Tillack G.-R. Adaptive image reconstruction with predictive model // Maximum Entropy and Bayesian Methods. Eds. W. von der Linden e. a. Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 123—130.
22. Artemiev V.M., Naumov A.O., Tillack G.-R. Recursive Tomographic Image Reconstruction Using a Kalman Filter Approach in the Time Domain // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 2073—2083.
23. Artemiev V.M., Naumov A.O., Tillack G.-R. Statistical Estimation theory Approach for the Dynamic Image Reconstruction / Proc. 2nd WorldCongress on Industrial Process Tomography. Hannover, Germany, August 2001. Hannover, 2001. P. 772—779.
24. Naumov A., Khmarskiy P., Byshnev N., Piatrowski M. Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations // Engineering Applications. 2023. V. 2. No. 3. P. 243—253.

ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

© 2024 г. М.И. Горлов^{1,*}, В.А. Сергеев^{2,3,**}

¹Воронежский государственный технический университет, Россия 394006 Воронеж,
ул. 20-летия Октября, 84

²УФИРЕ им. В.А. Котельникова РАН, Россия 432073 Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

³Ульяновский государственный технический университет,

Россия 432029 Ульяновск, ул. Серверный венец, 32

E-mail: *m-gorlov@inbox.ru; **sva@ulstu.ru

Поступила в редакцию 01.12.2023; после доработки 28.05.2024

Принята к публикации 31.05.2024

Данная статья является продолжением и дополнением статьи с таким же названием, опубликованной в журнале «Дефектоскопия» № 1 за 2022 год, в которой приведены шесть способов оценки качества и надежности полупроводниковых изделий (ППИ) с использованием параметров низкочастотного (НЧ) шума. В настоящей статье представлено обобщение ранее полученных авторами результатов и описывается еще четыре способа диагностики и оценки надежности ППИ по изменению параметров НЧ-шума при дополнительных внешних воздействиях, таких как электростатический разряд и (или) термический отжиг. Показано, что дополнительные воздействия позволяют повысить достоверность оценки надежности ППИ.

Ключевые слова: полупроводниковые изделия, транзисторы, качество, надежность, низкочастотный шум, диагностика, прогнозирование.

TESTING SEMICONDUCTOR PRODUCTS USING LOW-FREQUENCY NOISE PARAMETERS

© 2024 M.I. Gorlov^{1,*}, V.A. Sergeev^{2,3,**}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh 394006 Russia

²Ulyanovsk Branch, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
Ulyanovsk 432073 Russia

³Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk 432029 Russia

E-mail: *m-gorlov@inbox.ru; **sva@ulstu.ru

This article is a continuation and addition of the article with the same title published in the journal «Defectoscopy» No. 1 for 2022, which provides six ways to assess the quality and reliability of semiconductor products (SCP) using low-frequency (LF) noise parameters. This article presents a generalization of the results previously obtained by the authors and describes four more methods for diagnosing and evaluating the reliability of SCP by changing the parameters of low-frequency noise under additional external influences such as electrostatic discharge and (or) thermal annealing. It is shown that additional impacts make it possible to increase the reliability of the assessment of the reliability of the SCP.

Keywords: semiconductor products, transistors, quality, reliability, low-frequency noise, diagnostics, forecasting.

DOI: 10.31857/S0130308224060042

ВВЕДЕНИЕ

Считается общепризнанным, что уровень так называемого низкочастотного шума (НЧ-шума) полупроводниковых изделий (ППИ) определяется интенсивностью флуктуаций плотности носителей заряда в различных областях структуры ППИ, вызывающих флуктуации проводимости. Интенсивность этих флуктуаций в свою очередь определяется плотностью различного рода дефектов кристаллической решетки полупроводника, являющегося основой структуры ППИ, и неравновесными процессами в этой структуре при токопрохождении [1, 2]. Указанные процессы протекают как в объеме, так и на поверхности структуры ППИ и могут быть вызваны неравновесной генерацией-рекомбинацией носителей заряда, флуктуацией высоты потенциальных барьеров; туннелированием носителей через эти барьеры и т.п.

Универсальной и широко используемой для описания НЧ-шума ППИ характеристикой, определяющей его вид и свойства, является спектральная плотность мощности (СПМ) $S(f, I)$. Зависимость СПМ НЧ-шума ППИ от частоты f и силы тока I обычно аппроксимируется выражением [1, 2]:

$$S(f, I) = AI^\alpha/f^\gamma,$$

где значения коэффициента A , определяющего уровень НЧ-шума, показателя степени α и показателя формы спектра γ определяются свойствами исследуемого ППИ, при этом показатель α степени токовой зависимости НЧШ при токах, не приводящих к локальным перегревам, обычно близок к двум ($\alpha \approx 2$), а показатель γ близок к единице ($\gamma \approx 1$).

Существенное превышение уровня НЧ-шума некоторого среднего по выборке ППИ уровня свидетельствует о повышенной дефектности и потенциальной ненадежности изделия, а значение уровня НЧ-шума целесообразно использовать для отбраковки потенциально ненадежных изделий [3—6]. Однако достоверность отбраковки дефектных ППИ по уровню шума является невысокой (~50 %). Для повышения достоверности прогнозирования надежности эффективным является использование различных внешних воздействий (электростатический разряд, облучение, например, рентгеновским или гамма-излучением, термоциклирование и т.п.) на ППИ [7—10]. Такие воздействия приводят к активации существующих и генерации новых дефектов в структуре ППИ, что в свою очередь будет приводить к изменению параметров НЧ-шума [11].

Как уже отмечалось, зависимость СПМ НЧ-шума от режима работы ППИ определяется тремя параметрами, зависящими от внутреннего состояния структуры изделия: уровень шума A (например, квадрат среднеквадратичного значения шумового напряжения $\bar{U}_{ш}^2$, измеренного в определенной полосе частот); показатель формы спектра γ , характеризующий степень изменения СПМ НЧ-шума от частоты, и коэффициент α токовой зависимости СПМ НЧ-шума. При использовании внешних воздействий на ППИ для отбраковки потенциально ненадежных изделий более информативными могут быть не абсолютные значения параметров НЧ-шума, а их изменение после воздействия [1].

Цель данной статьи — показать возможности разработанных, апробированных на практике и получивших дальнейшее развитие в последние годы в Воронежском государственном техническом университете и УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН способов диагностики и разделения ППИ по надежности с использованием параметров НЧ-шума и дополнительных воздействий.

ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ППИ ПО ПАРАМЕТРАМ НЧ-ШУМА ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Первый способ — способ определения потенциально ненадежного ППИ [12] путем измерения величины относительного изменения интенсивности шума до и после подачи электростатического разряда (ЭСР), по которой судят о потенциальной нестабильности ППИ. Для этого на приборы воздействуют ЭСР напряжением, на 20–30 % превышающим допустимый по техническим условиям (ТУ) потенциал, после чего проводят термический отжиг при температуре 100—125 °С в течение 2—4 ч, а величину относительного изменения интенсивности шумов рассчитывают по формуле:

$$F = (\bar{U}_{ш\ ЭСР}^2 - \bar{U}_{ш\ нач}^2) / (\bar{U}_{ш\ ЭСР}^2 - \bar{U}_{ш\ отж}^2),$$

где $\bar{U}_{ш\ нач}^2$, $\bar{U}_{ш\ ЭСР}^2$, $\bar{U}_{ш\ отж}^2$ — значения уровня шума до, после воздействия ЭСР и после отжига соответственно.

В зависимости от критерия F , установленного для каждого типа ППИ, определяют надежность изделия. Предложенный способ был опробован на транзисторах типа КТ133А. У 10 штук транзисторов типа КТ133А, отобранных методом случайной выборки, измерили среднеквадратичное напряжение шума на частоте 1 кГц в полосе частот 200 Гц. После этого на каждый транзистор воздействовали ЭСР амплитудой 1500 В и снова измеряли уровень шума. Затем провели отжиг при 100 °С в течение двух часов и вновь измерили шум. Результаты измерений приведены в табл. 1.

При установлении критерия отбраковки $F > 1,125$ к потенциально ненадежным будут отнесены транзисторы №№ 10, 1, 8. Установив второй, более жесткий критерий отбора: $F > 1$, к приборам повышенной надежности будут отнесены транзисторы № 2, 6, 7, а транзисторы № 3, 9, 4, 5 по надежности соответствуют ТУ на данный тип транзисторов.

Для проверки достоверности описанного способа разделения транзисторов на потенциально ненадежные и приборы с повышенной надежностью на каждый транзистор воздействовали ЭСР, начиная с напряжения 1500 В с повышением напряжения каждого следующего импульса на 100 В до появления катастрофического отказа. Результаты испытаний транзисторов приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, с повышением надежности транзистора увеличивается напряжение ЭСР, приводящее к катастрофическому отказу транзистора.

Таблица 1

Результаты измерения уровня шума транзисторов КТ133А до и после воздействий

№ транзистора	Значение уровня шума, мВ ²			F
	$\bar{U}_{ш\text{ нач}}^2$	$\bar{U}_{ш\text{ ЭСР}}^2$	$\bar{U}_{ш\text{ отж}}^2$	
1	55	62	57	1,4
2	57	61	57	1,0
3	59	68	60	1,125
4	69	77	70	1,14
5	67	78	68	1,1
6	59	67	59	1,0
7	60	68	60	1,0
8	50	55	51	1,25
9	62	69	63	1,18
10	65	73	88	1,6

Таблица 2

Оценка надежности транзисторов КТ133А по уровню ЭСР, приводящему к катастрофическому отказу

Оценка надежности транзисторов	№ транзистора	Напряжение ЭСР, приводящее к катастрофическому отказу, В
Потенциально ненадежен	10	1900
Потенциально ненадежен	1	2100
Потенциально ненадежен	8	2400
Надежность соответствует ТУ	3	2800
Надежность соответствует ТУ	9	3200
Надежность соответствует ТУ	4	3300
Надежность соответствует ТУ	5	3500
Повышенная надежность	2	4200
Повышенная надежность	6	4000
Повышенная надежность	7	3900

Таблица 3

Интенсивность шумов различных переходов транзисторов

№ п/п	Уровень НЧ-шума $p-n$ -переходов, $\bar{U}_{ш}^2$, мВ ²		Значение разности уровня шума $\Delta \bar{U}_{ш}^2$, мВ ²
	Э—Б	К—Б	
1	67	62	5
2	69	63	6
3	73	64	9
4	65	63	3
5	68	65	3
6	69	66	3
7	72	66	6
8	70	67	3
9	64	60	4
10	66	61	5
11	67	64	3
12	71	68	3
13	73	69	4
14	70	66	4
15	68	67	1

По второму способу [13] определение потенциально ненадежных транзисторов проводят по разности значений уровня НЧ-шума переходов Э—Б и К—Б. Способ апробирован на 15 транзисторах КТ3107А, отобранных методом случайной выборки: значения уровней НЧ-шумов переходов Э—Б и К—Б и их разности приведены в табл. 3, минимальное, среднее и максимальное значение их разности приведены в табл. 4.

Таблица 4

Обработанные данные уровня НЧ-шума для p — n -переходов транзисторов КТ3107А

p — n -переход	Значение $\bar{U}_{ш}^2$, мВ ²		
	Минимальное	Среднее	Максимальное
Э—Б	65	68,8	73
К—Б	60	64,7	69
Значение разности	5	4,1	4

Из табл. 4 определяем, что у надежных транзисторов разность уровня НЧ-шума $\Delta_{шп} = \bar{U}_{ш\text{ЭБ}}^2 - \bar{U}_{ш\text{КБ}}^2$ должно быть не более 5, поэтому транзисторы № 2, 3, 7 будут потенциально ненадежными.

Для подтверждения способа проведены испытания транзисторов на долговечность в течение 2000 ч при нормальной температуре, напряжении коллектор—база $U_{КБ} = 30$ В и коллекторном токе $I_{К} = 10$ мА. Получены следующие результаты: коэффициент усиления по току всех испытываемых транзисторов был в нормах ТУ. Обратный ток $I_{КБ0}$ перехода коллектор—база после испытаний у транзисторов №№ 2, 3, 7 увеличился в 10—15 раз, выйдя за нормы ТУ; у остальных транзисторов $I_{КБ0}$ увеличился в 3—8 раз, оставаясь в нормах ТУ. Таким образом, транзисторы №№ 2, 3, 7 оказались ненадежными.

Третий способ разделения ППИ по надежности [14] состоит в следующем. У каждого изделия измеряют уровень НЧ-шума в диапазоне токов до 1 мА, строят ампер-шумовые характеристики для максимальных и минимальных значений $\bar{U}_{ш}^2$, определяют значение тока, при котором разброс ампер-шумовых характеристик наибольший, находят среднее значение $\bar{U}_{ш}^2$ для этих значений тока, и по величине отклонения $\bar{U}_{ш}^2$ каждого изделия от среднего значения при данном токе проводят их разделение по надежности.

Предлагаемый способ разбраковки был опробован на транзисторах типа КТ3102. Из партии транзисторов объемом более 500 штук, полностью соответствующих ТУ, было методом случайной выборки отобрано 20 транзисторов, на которых измерено значение уровня НЧ-шума $\bar{U}_{ш}^2$ при эмиттерных токах 0,05; 0,1; 0,5; 1 мА. Наибольшее значение $\bar{U}_{ш}^2$ наблюдалась у транзистора № 9, наименьшее у транзистора № 4. Были построены ампер-шумовые характеристики для транзисторов № 9 и № 4 (рис. 1). Видно, что наибольшая разность уровня шума (Δ) у транзисторов наблюдается при токе 0,5 мА:

$$\Delta_{шт} = \bar{U}_{ш,9}^2 - \bar{U}_{ш,4}^2 = 6 \text{ мВ}^2.$$

Для этого значения тока среднее значение уровня НЧ-шума на выборке из 20 транзисторов равно 12,7 мВ². Соответственно, транзисторы, у которых $\bar{U}_{ш}^2 \geq 12,7 \text{ мВ}^2$, относят к группе менее надежных транзисторов, а транзисторы со значением $\bar{U}_{ш}^2$ менее 12,7 мВ² — к группе более надежных транзисторов.

Четвертый способ разделения ППИ по надежности [15] состоит в следующем: случайным образом из партии ППИ формируется выборка изделий, измеряется уровень шума $\bar{U}_{ш}^2$ на двух частотах 1000 и 200 Гц при трех разных температурах (0°C, нормальной и 100°C), вычисляют показатель γ формы спектра шума для каждой температуры по формуле:

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{\bar{U}_{шf_1}^2}{\bar{U}_{шf_2}^2}\right)}{\ln(f_2/f_1)},$$

где $\bar{U}_{шf_1}^2$, $\bar{U}_{шf_2}^2$ — квадрат эффективного напряжения шума соответственно на частоте f_1 и f_2 для каждой температуры. Для каждого изделия находят среднее значение $\gamma_{ср}$ по трем температурам и по величине среднего значения $\gamma_{ср}$ партию изделий разделяют на надежные и потенциально ненадежные.

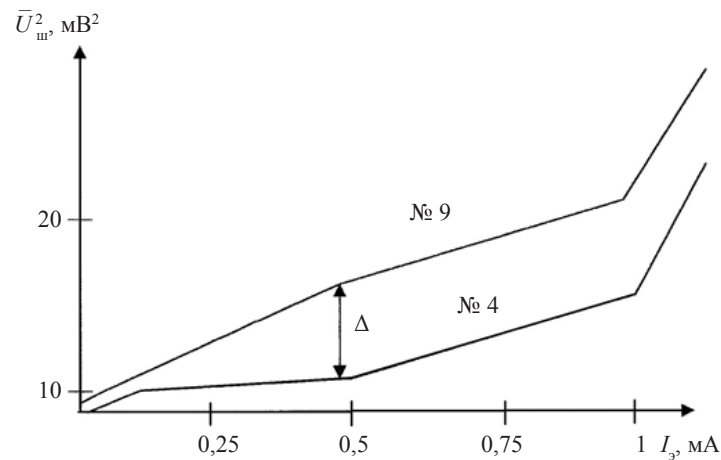


Рис. 1. Ампер-шумовые характеристики для транзисторов № 9, № 4.

Способ был опробован на 10 интегральных схемах (ИС) типа КР537Р413, у которых значение $\bar{U}_{ш}^2$ измерялось методом прямого измерения по выводам «питание — общая точка» на частотах $f_1 = 200$ Гц и $f_2 = 1000$ Гц; ширина полосы частот при измерении $\Delta f_1 = 200$ Гц, время усреднения $t = 2$ с. В табл. 5 приведены измеренные значения $\bar{U}_{ш}^2$ при разных температурах, а в табл. 6 — вычисленные для каждого изделия значения параметра γ и его среднее значение по трем температурам.

Таблица 5

Значения уровня НЧ-шума ИС при разных температурах, на двух частотах $\bar{U}_{ш}^2$, мВ²

№ ИС	0 °С		20 °С		100 °С	
	200 Гц	1000 Гц	200 Гц	1000 Гц	200 Гц	1000 Гц
1	644,7	79,6	439,9	68	853,7	97,9
2	836,3	96,8	553,8	79	1334,2	123,2
3	245,2	44,5	203,3	42	310,6	50,4
4	568,9	74,9	394,5	64	783,7	92,2
5	1322,7	124,2	786	97	1974,6	163
6	615,6	78,4	419,7	67	875	96,8
7	259,2	45,6	201,6	43	310,7	81,6
8	1294	125,4	833,4	98	2062,8	184,6
9	417,3	62,4	303,5	56	534,8	73,9
10	832,6	91,9	534,3	75	1209	117

Таблица 6

Значения показателя γ формы спектра НЧ-шума ИС при разных температурах

№ ИС	0 °С	25 °С	100 °С	$\gamma_{ср}$
1	1,3	1,16	1,35	1,27
2	1,34	1,21	1,48	1,34
3	1,06	0,96	1,13	1,06
4	1,26	1,13	1,33	1,24
5	1,47	1,3	1,55	1,44
6	1,28	1,14	1,37	1,26
7	1,08	0,96	1,12	1,05
8	1,45	1,33	1,57	1,45
9	1,18	1,05	1,23	1,15
10	1,37	1,22	1,45	1,35

Приняв в качестве критерия для надежных ИС $\gamma \leq 1,4$, то ИС № 5, 8 будут потенциально ненадежными (см. табл. 6). Можно также выделить группу ИС повышенной надежности, выбрав более жесткий критерий $\gamma \leq 1,1$: это будут ИС № 3, 7. При проведении испытаний ИС (500 ч, 100°C) образцы № 5, 8 имели параметрические отказы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены различные способы диагностики ППИ и разделения их по надежности по изменению различных параметров НЧ-шума после различного вида физических воздействий на ППИ.

На достаточно представительных выборках ППИ различных классов и типов путем статистических оценок [16] показано, что диагностические методы разделения ППИ по надежности с использованием характеристик НЧ-шумов в комбинации с внешними воздействиями имеют достоверность, близкую к достоверности результатов испытаний на надежность. При этом предлагаемые способы существенно менее трудоемки и затратны, чем традиционные испытания на надежность, и могут быть рекомендованы для применения на практике.

Однако при применении на практике предлагаемых способов диагностики и разделения по надежности для новых классов и типов ППИ необходимо проведение статистически репрезентативных исследований для правильного определения объема выборки и критерия годности (отбраковки) ППИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горлов М.И., Сергеев В.А. Диагностика полупроводниковых изделий по параметрам низкочастотного изделия // Дефектоскопия. 2022. № 1. С. 13—25.
2. Жигальский Г.П. Неразрушающий контроль качества и предсказание надежности интегральных микросхем по электрическим шумам и параметрам надежности // Радиотехника и электроника. 2005. № 5. С. 1—35.
3. Claeys C., Simoen E., Agopian P.G.D., Martino J.A., Aoulaiche M., Cretus B., Fang W., Rooyackers R., Vandooren A., Veloso A., Jurczak M., Collaert N., Thean A. The Smaller the Noisier? Low Frequency Noise Diagnostics of Advanced Semiconductor Devices / August Conference: 2015 30-th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro). DOI: 10.1109/SBMicro.2015.7298104
4. Романцов В.П., Долганов М.В. Прогнозирование надежности интегральных микросхем по параметрам низкочастотных шумов. Киев: ИПМЭ, 1990. 58 с.
5. Васильев В.А., Пиганов М.Н., Зайцев В.Ю. Контроль качества полупроводниковых диодов по напряжению шума / Актуальные проблемы радиоэлектроники. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Под общ. ред. Ю.Ф. Широкова. Самара: СГАУ, 1999. Вып. 2. С. 63—65.
6. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. 2008. № 9 (86). С. 168—174.
7. Бордюжа О.Л. Диагностический контроль качества и надежности кремниевых биполярных интегральных схем / Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 1998. 163 с.
8. Антонова Е.А. Влияние рентгеновского излучения на параметры полупроводниковых изделий / Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 2013. 107 с.
9. Yang X., Chen Y.Q., Hou B., X. Xu, Wang J., Huang Y., Chen Q., Zhou C. Degradation Behavior and Defect Analysis for SiC Power MOSFETs Based on Low-Frequency Noise Under Repetitive Power-Cycling Stress // IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. V. 68. No. 2. P. 666—671. DOI: 10.1109/TED.2020.3044018
10. Yang F., Liao M., Zeng B., Yang P., Chen Y. Investigation on the Degradation Mechanism of AlGaN/GaN HEMTs Under the Effect of Microwave Pulses at Different Powers / 2023 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Hangzhou), Hangzhou, China. 2023. P. 1—5. DOI: 10.1109/PHM-Hangzhou58797.2023.10482775
11. Якубович Б.И. Влияние проникающих излучений на электрический низкочастотный шум полупроводников // Успехи прикладной физики. 2021. № 3. С. 181—186.
12. Горлов М.И., Жарких А.Н. Способ определения потенциально ненадежных полупроводниковых изделий / Пат. № 2230335 РФ. Оpubл. 10.06.2004. Бюл. № 16.
13. Горлов М.И., Жарких А.Н., Емельянов В.А. Способ определения потенциально ненадежных транзисторов / Пат. № 2234163 РФ. Оpubл. 10.08.2004. Бюл. № 22.
14. Горлов М.И., Емельянов В.А., Жарких А.Н. Способ разбраковки полупроводниковых приборов / Пат. № 2253168 РФ. Оpubл. 27.05.2005. Бюл. № 15.
15. Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Ануфриев Д.Л. Способ разделения полупроводниковых изделий по надежности. Пат. № 2298052 РФ. Оpubл. 20.01.2007. Бюл. № 2.
16. Булгаков О.М., Таравков М.В. Статистический критерий оценки надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на основе характеристик низкочастотного шума // Вестник Воронежского института МВД России. 2012. № 3. С. 147—155.

REFERENCES

1. Gorlov M.I., Sergeev V.A. Testing Semiconductor Products Using Low-Frequency Noise Parameters // Defectoscopia. 2022. No. 1. P. 13—25.
2. Zhigalsky G.P. Non-destructive quality control and prediction of reliability of integrated circuits by electrical noise and reliability parameters // Radio Engineering and Electronics. 2005. No. 5. P. 1—35.
3. Claeys C., Simoenl E., Agopian P.G.D., Martino J.A., Aoulaiche M., Cretus B., Fang W., Rooyackers R., Vandooren A., Veloso A., Jurczak M., Collaertl N., Thean A. The Smaller the noisier? Low frequency noise diagnostics of advanced semiconductor devices / 30-th Symp. Microelectron. Technol. Devices (SBMicro), Salvador, August 2015. <https://doi.org/10.1109/SBMicro.2015.72981044>
4. Romantsov V.P., Dolganov M.V. Prognozirovanie nadezhnosti integralnyh microsgem po parametram nizkochastotnogo shuma (Forecasting the reliability of integrated circuits based on low-frequency noise parameters). Kiev: IPME, 1990. 58 p.
5. Vasiliev V.A., Zaitsev V.Yu. Quality control of semiconductor diodes by noise voltage // Actual problems of radioelectronics. 1999. Is. 2. P. 63—65.
6. Razumenko D. Low-frequency noise of electronic components as a tool for diagnosing internal defects // Components and technologies. 2008. No. 9 (86). P. 168—174.
7. Bordyuzha O.L. Diagnostic quality control and reliability of silicon bipolar integrated circuits / Diss. ... Candidate of Technical Sciences. Voronezh: VSTU, 1998. 163 p.
8. Antonova E.A. The effect of X-ray radiation on the parameters of semiconductor products / Diss. ... Candidate of Technical Sciences. Voronezh: VSTU, 2013. 107 p.
9. Yang X., Chen Y. Q., Hou B., Xu X., Wang J., Huang Y., Y. Chen Y., Zhou C. Degradation Behavior and Defect Analysis for SiC Power MOSFETs Based on Low-Frequency Noise Under Repetitive Power-Cycling Stress // IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. V. 68. No. 2. P. 666—671. DOI: 10.1109/TED.2020.3044018
10. Yang F., Liao M., Zeng B., Yang P., Chen Y. Investigation on the Degradation Mechanism of AlGaIn/GaN HEMTs Under the Effect of Microwave Pulses at Different Powers, 2023 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Hangzhou), Hangzhou, China, 2023. P. 1—5. DOI: 10.1109/PHM-Hangzhou58797.2023.10482775
11. Yakubovich B.I. Influence of penetrating radiation on electrical low-frequency noise of semiconductors // Uspehi prikladnoy fiziki Successes of applied Physics. 2021. No. 3. P. 181—186.
12. Gorlov M.I., Zharkikh A.N. A method for determining potentially unreliable semiconductor products / RF Patent No. 2230335. Byull. Izobret. 2004. No. 16.
13. Gorlov M.I., Zharkikh A.N., Yemelyanov V.A. A method for determining potentially unreliable transistors / RF Patent No. 2234163. Byull. Izobret. 2004. No. 22.
14. Gorlov M.I., Yemelyanov V.A., Zharkikh A.N. Method of disassembly of semiconductor devices / RF Patnt No. 2253168. Byull. Izobret. 2005. No. 15.
15. Gorlov M.I., Smirnov D.Y., Anufriev D.L. Method of separation of semiconductor products by reliability / RF Patent No. 2298052. Byull. Izobret. 2007. No. 2.
16. Bulgakov O.M., Taravkov M.V. Statistical criterion for assessing the reliability of semiconductor devices and integrated circuits based on low-frequency noise characteristics // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2012. No. 3. P. 147—155.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СРОКАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ И ДИАГНОСТИКА ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ТЕМПОВ НАГРЕВА

© 2024 г. В.Г. Дегтярь^{1,*}, В.В. Гусев¹, С.Т. Калашников^{2,**}, Г.Ф. Костин², А.И. Новиков^{1,3,***}, В.И. Хлыбов^{1,2}

¹ АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»,
Россия 456300 Миасс, Туроякское шоссе, 1

² Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Россия 456317 Миасс, Ильменский заповедник

³ Филиал в г. Миассе ГОАУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), Россия
456318 Миасс, пр-т Октября, 16

E-mail: *src@makeyev.ru; **finigz@mineralogy.ru; ***info@miass.susu.ru

Поступила в редакцию 07.06.2024; после доработки 13.06.2024

Принята к публикации 14.06.2024

Комплекс работ по диагностике изменения характеристик материалов вследствие старения включает в себя ускоренные климатические испытания (УКИ) и испытания по определению характеристик до и после УКИ. Наряду с применением различных методов диагностики дефектов, возникающих и развивающихся в процессе старения, важны также вопросы определения связанных с процессами изменений структуры материала изменений теплофизических, влагофизических и других характеристик материалов, прошедших длительные сроки эксплуатации. В работе, наряду с методом синхронного расчета изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов вследствие старения и соответствующих поправок к изменению тепловлажностных режимов изделий при длительных сроках эксплуатации и хранения, представлены также экспериментальная установка и метод экспериментально-аналитического определения теплофизических характеристик материалов при переменных темпах нагрева по результатам тепловых испытаний образцов, прошедших и не прошедших УКИ, с использованием при анализе результатов испытаний аппроксимационно-суперпозиционного метода для решения обратной задачи теплопроводности.

Ключевые слова: старение материалов, диагностика изменения свойств материалов, теплофизические характеристики, влагофизические характеристики, тепловые испытания, обратные задачи теплопроводности.

CHANGES IN THE MATERIAL PROPERTIES AND HEAT AND HUMIDITY CONDITIONS FOR LONG-TERM OPERATION OF PRODUCTS AND DIAGNOSTICS OF THE DEPENDENCE OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES ON HEATING RATES

© 2024 V.G. Degtiar^{1,*}, V.V. Gusev¹, S.T. Kalashnikov^{2,**}, G.F. Kostin², A.I. Novikov^{1,3,***}, V.I. Khlybov^{1,2}

¹ Joint Stock Company "Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre",
Russia 456300 Miass, Turgoyakskoye shosse, 1

² South Ural Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of RAS,
Russia, 456317 Miass, Ilmensky zapovednik

³ Miass Branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University"
(National Research University), Russia, 456318, Miass, pr. Oktyabrya, 16

E-mail: *src@makeyev.ru; **finigz@mineralogy.ru; ***info@miass.susu.ru

The complex of works on the diagnostics of changes in the material properties due to aging includes accelerated climatic tests (ACT) and performance tests before and after ACT. Along with the use of various methods for diagnosing defects that arise and develop during aging, it is also important to determine the changes in the thermophysical, moisture-physical and other properties of materials that have passed long-term operation associated with the processes of changes in the material structure. In addition to the method of synchronous analysis of changes in the thermophysical and moisture-physical properties of materials due to aging and corresponding corrections to changes in the heat and humidity conditions of products during long periods of operation and storage, an experimental facility and a method for experimental and analytical determination of the thermophysical properties of materials at variable heating rates based on the results of thermal tests of samples that have passed and have not passed ACT, using the approximation-superposition method in the analysis of test results to solve the inverse problem of thermal conductivity.

Keywords: aging of materials, diagnostics of changes in the properties of materials, thermophysical properties, moisture-physical properties, thermal testing, inverse problems of heat conductivity.

DOI: 10.31857/S0130308224060059

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время накоплен достаточно обширный фактический материал по изменениям теплофизических (ТФХ) и влагофизических (ВФХ) и других характеристик материалов, прошедших длительные сроки эксплуатации в составе элементов конструкций изделий, или измеренных на образцах, прошедших ускоренные климатические испытания. Пример таких изменений представлен в табл. 1. Это происходит вследствие изменения структурных параметров материалов в процессе старения, в том числе накапливаются и развиваются внутренние дефекты типа микротрещин. Вопросы же диагностики дефектов, вероятность обнаружения дефектов зависят от их типа, размера, формы и ориентации в объектах контроля [1]. В частности, при эксплуатации объектов из углепластиков, подвергаемых не только механическим, но и тепловлажностным нагрузкам, возникает опасность их внезапного разрушения. Этому предшествуют накопления повреждений на уровне структуры материала, которые могут быть вызваны как технологическими причинами (низкая степень отверждения полимерной матрицы, разрыв упрочняющих волокон), так и различными внешними воздействиями [2]. Наряду с применением различных методов диагностики дефектов, возникающих и развивающихся в процессе старения, важны также вопросы определения связанных с процессами изменений на уровне структуры материала изменений теплофизических, влагофизических и других характеристик материалов, прошедших длительные сроки эксплуатации. Изменения характеристик, в том числе и развитие дефектов, зависят от тепловых и влажностных режимов, реализующихся при длительных сроках хранения и эксплуатации материалов в составе изделий, и важным является вопрос прогнозирования этих изменений в зависимости от условий хранения и эксплуатации. В связи с этим в настоящей работе, наряду с методом синхронного расчета изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов вследствие старения и соответствующих поправок к изменению тепловлажностных режимов изделий при длительных сроках эксплуатации и хранения, представлены также экспериментальная установка и метод экспериментально-аналитического определения теплофизических характеристик материалов при переменных темпах нагрева по результатам тепловых испытаний образцов, прошедших и не прошедших УКИ.

1. МЕТОД РАСЧЕТНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В представленной табл. 1 приведены примеры фактических данных по изменению теплофизических характеристик некоторых материалов после длительных сроков эксплуатации и УКИ. Эти данные были обобщены авторами в ходе работ по дефектации изделий и образцов после длительных сроков эксплуатации и УКИ. Видно, что свойства могут меняться на 10—35 %, вследствие чего фактические значения температуры элементов конструкций и при хранении, и при нагреве в условиях штатного применения могут превышать расчетные.

Материалы типа ТТП-ФС, ТТП-Т — это тонкослойные теплозащитные покрытия на основе хлорсульфированного полиэтилена с различными мелкодисперсными наполнителями, в частности в виде фенольных микросфер. ПКТ-Д — это кварцетекстолитовое теплозащитное покрытие на основе наполнителя из кварцевой ткани с фенолформальдегидным связующим, отверждаемое под давлением. Изменения свойств материалов могут быть значимыми, как это видно из табл. 1, но вместе с тем являются относительно малыми по отношению к исходным, неизменным значениям. Это обусловлено в том числе требованиями по обеспечению активной работоспособности изделий, например, выполнения ракетой полетного задания в течение всего гарантийного срока. Естественно, что вопросы старения материалов, разработки и совершенствования методов испытаний на старение (натурных и УКИ), методов обработки и анализа результатов испытаний являются актуальными [3—13 и др.]. Обзор указанных и других работ показал, что метод синхронного расчета тепловлажностных режимов и изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов вследствие старения, основы которого были разработаны в 2015 году [14], пока не используется. Вместе с тем, этот метод может применяться и при анализе УКИ с целью определения кинетических параметров изменения свойств в процессе старения. Кратко суть метода представлена ниже. Обозначая исходные, не измененные значения ТФХ нижним индексом «н», а дополнительные изменения вследствие старения — волной сверху, зависимость для изменения свойств материалов при эксплуатации и хранении можно представить в виде:

$$\eta = \eta_n + \tilde{\eta} \left(\theta, T, \int_0^{\tau} k_n e^{\frac{E_n}{RT}} d\tau \right), \quad (1)$$

Пример изменения теплофизических характеристик некоторых материалов вследствие старения

Материал	Плотность ρ , г/см ³		Коэффициент теплопроводности λ , Вт/мК		Удельная теплоемкость c_p , кДж/кгК		Срок эксплуатации ^{*)} , годы
	Значения до УКИ или срока службы	Значения после УКИ или срока службы	Значения до УКИ или срока службы	Значения после УКИ или срока службы	Значения до УКИ или срока службы	Значения после УКИ или срока службы	
ТТП-ФС	$\frac{0,28-0,36}{0,32}^{**})$	$\frac{0,34-0,37}{0,36}$	$\frac{0,046-0,07}{0,058}$	$\frac{0,060-0,100}{0,078}$	$\frac{1,55-1,85}{1,70}$	$\frac{1,80-2,10}{1,93}$	15—23 (6 изделий)
	До УКИ 0,36	После УКИ 0,37	До УКИ 0,066	После УКИ 0,068	До УКИ 1,97	После УКИ 1,99	18 ^{*)}
	До УКИ 0,36	После УКИ 0,42	До УКИ 0,067	После УКИ 0,076	До УКИ 1,94	После УКИ 1,98	18 ^{*)}
Асботекстолит АТ-342	$\frac{1,20-1,60}{1,40}^{**})$	$\frac{1,40-1,57}{1,49}$	$\frac{0,35-0,67}{0,51}$	$\frac{0,54-0,61}{0,56}$	$\frac{0,96-1,29}{1,125}$	$\frac{1,01-1,11}{1,066}$	20—24 (7 изделий)
ПКТ-Д	$\frac{1,53-1,73}{1,63}^{**})$	$\frac{1,60-1,64}{1,62}$	$\frac{0,30-0,46}{0,38}$	$\frac{0,410-0,465}{0,436}$	$\frac{0,75-1,01}{0,88}$	$\frac{0,79-0,95}{0,87}$	10,5—15,5 (8 изделий)
ТТП-Г	$\frac{1,25-1,77}{1,51}^{**})$	—	$\frac{0,11-0,23}{0,17}^{**})$	После УКИ 0,164	$\frac{0,81-0,95}{0,88}^{**})$	После УКИ 1,00	18 ^{*)}
			До УКИ 0,164	После УКИ 0,155	До УКИ 1,00	После УКИ 1,35	21 ^{*)}

^{*)} для УКИ — моделируемый срок эксплуатации; ^{**) —} данные по ТУ на материал.

где η — индекс свойства материала; E_η — энергия активации процессов изменения η -го свойства при старении; k_η — предэкспонентные множители в уравнении Аррениуса; R — газовая постоянная; θ — потенциал влажности; T — температура; τ — время.

В частности, для коэффициента теплопроводности λ зависимость (1) принимает вид:

$$\lambda = \lambda_n + \tilde{\lambda} \left(\theta, T, \int_0^\tau \left(k_\lambda e^{-\frac{E_\lambda}{RT}} \right) d\tau \right). \quad (2)$$

Значения зависимостей с волной можно принимать как малые первого порядка по сравнению со значениями с нижним индексом «н».

Уравнения теплопроводности и влагопроводности являются подобными. Уравнение теплопроводности:

$$(c_p \rho) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v, \quad (3)$$

где c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; q_v — тепловыделение (телопоглощение, источник, сток); ρ — плотность материала.

Уравнение влагопроводности:

$$(c\rho) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \operatorname{div}(c\rho D \operatorname{grad} \theta) + m_v, \quad (4)$$

где θ — потенциал влагопереноса; $\lambda_v = (c\rho)D$ — коэффициент влагопроводности материала; $c = \partial u / \partial \theta$ — влагоемкость материала; $u(\theta, T)$ — равновесное влагосодержание материала; $D(\theta, T)$ — коэффициент диффузии влаги в материале; m_v — влаговыделение (влагопоглощение, источник, сток).

Подставляя зависимости вида (1), (2) в уравнение (3), после отбрасывания малых второго порядка, с учетом тождественного удовлетворения уравнения (3) при номинальных значениях, получим:

$$c_{pn} \rho_n \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_n \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_n \frac{\partial \tilde{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_n \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} \right) + \tilde{q}_v, \quad (5)$$

где $\tilde{q}_V$ — источниковый член за счет поглощения (выделения) энергии при процессах, вызывающих отклонения значений свойств от номинального (исходного) значения:

$$\tilde{q}_V = -\left(c_{pH}\tilde{\rho} + \tilde{c}_p\rho_H\right)\frac{\partial T_H}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial T_H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial T_H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial T_H}{\partial z}\right). \quad (6)$$

Уравнение (5) и исходное уравнение (3) по виду совпадают. Если зависимости вида (1), (2) известны, то с использованием решения $T_H = T_H(x, y, z, \tau)$, полученного при номинальных значениях c_{pH} , ρ_H , λ_H , q_{VH} , можно найти значения величин изменения характеристик в процессе старения, а с использованием этих значений определить добавочный источниковый член $\tilde{q}_V$ за счет поглощения (выделения) энергии при процессах старения. Затем из решения уравнения (5) при нулевых граничных и начальных условиях находятся значения функции $T(x, y, z, \tau)$ отклонения поля температуры за счет изменения свойств материалов в процессе старения. При необходимости можно принять полученные значения $T_H(x, y, z, \tau) + \tilde{T}(x, y, z, \tau)$

и $\eta_H + \tilde{\eta}\left(\theta, T, \int_0^\tau \left(k_\eta e^{-\frac{E_\eta}{RT}}\right) d\tau\right)$ за номинальные и провести расчет второго приближения и так далее.

Аналогично и для уравнения влагопроводности. После подстановки зависимостей вида (1), (2) в уравнение (4) и отбрасывания малых второго и большего порядков малости, с учетом тождественного выполнения при номинальных значениях уравнения (4), получим уравнение:

$$(c_H\rho_H)\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(c_H\rho_H D_H \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_H\rho_H D_H \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_H\rho_H D_H \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z}\right) + \tilde{m}_V, \quad (7)$$

где с точностью до малых второго и более высокого порядков:

$$\begin{aligned} \tilde{m}_V = & \frac{\partial}{\partial x}\left(c_H\tilde{\rho}D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\tilde{c}_p\rho_H D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(c_H\rho_H\tilde{D} \frac{\partial \theta_H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_H\tilde{\rho}D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial y}\right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y}\left(\tilde{c}_p\rho_H D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_H\rho_H\tilde{D} \frac{\partial \theta_H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_H\tilde{\rho}D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\tilde{c}_p\rho_H D_H \frac{\partial \theta_H}{\partial z}\right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_H\rho_H\tilde{D} \frac{\partial \theta_H}{\partial z}\right) - c_H\tilde{\rho} \frac{\partial \theta_H}{\partial \tau} - \tilde{c}_p\rho_H \frac{\partial \theta_H}{\partial \tau}. \end{aligned}$$

Решая уравнение (7) при нулевых граничных и начальных условиях, получим решение для дополнительного изменения потенциала влагопереноса с учетом изменения свойств материалов в процессе старения. Аналогично можно сделать расчет второго и последующих приближений.

После УКИ различными методами, применяемыми для определения физических параметров и характеристик материалов, находят реализовавшиеся значения параметров и характеристик и их отличия от значений до УКИ. С использованием величин этих изменений и зависимостей вида (1), (2) можно по реализованным при УКИ значениям температуры и влажности определить значения k_η и E_η , в том числе для развития дефектов типа микро- и макротрещин, коррозионных дефектов.

2. ДИАГНОСТИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для проведения УКИ в АО «ГРЦ Макеева» имеется обширная экспериментальная база, на которой проводятся УКИ материалов и экспериментальная отработка систем и элементов конструкций изделий на долговечность. После УКИ проводятся испытания по определению характеристик материалов на образцах, прошедших УКИ, и на образцах-свидетелях, не прошедших УКИ. Используемые в уравнении (3) ТФХ зависят от температуры и темпов нагрева, особенно при прогреве и разложении композиционных материалов. В связи с этим одним из важных видов испытаний являются тепловые испытания по определению изменения зависимостей ТФХ материалов от температуры и темпов нагрева в процессе старения. Так как композиционные теплозащитные материалы в последние двадцать лет находят все более широкое применение в ракетной и космической технике, в частности в разработках АО «ГРЦ Макеева»

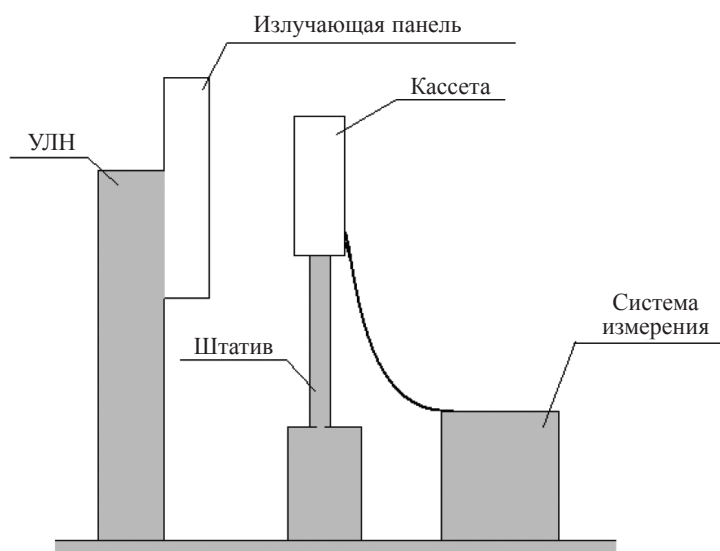


Рис. 1. Схема установки лучистого нагрева.

[15], то особенно актуальными являются задачи прогнозирования и определения эффективных ТФХ материалов, разлагающихся в процессе прогрева. Для определения теплоемкости и кинетических параметров разложения таких материалов применяют термогравиметрический метод, как это было сделано в работе [16], в которой представлены результаты испытаний и синхронного термического анализа образцов углепластикового материала с использованием прибора STA Netzsch STA 449 Jupiter и дериватографа Q-1000. Имеющиеся методы теоретического прогнозирования характеристик композиционных материалов в процессе нагрева, в частности углепластиковых материалов, требуют использования данных по ТФХ компонент, входящих в материал [17, 18], которые, как правило, также определяются экспериментально. Для определения и подтверждения ТФХ материалов при различных темпах и уровнях нагрева в АО «ГРЦ Макеева» используется установка лучистого нагрева (УЛН), оснащенная нагревателями в виде плоских панелей-отражателей с закрепленными на них параллельно панели лампами инфракрасного излучения. Схема установки приведена на рис. 1. Установка имеет систему крепления нагреваемых образцов (деталей) и систему измерений и регистрации тепловых параметров. При испытаниях крупных деталей могут использоваться несколько нагревательных панелей, при испытаниях образцов — одна, которая направляется на кассету крепления образцов. В кассете одновременно могут испытываться несколько образцов, в том числе подвергнутые УКИ на различные сроки старения, и образцы-свидетели (рис. 2). Нагревательные панели подключены к электросети через тиристорные регуляторы мощности. Мощность, подаваемая на нагревательные панели, может задаваться в пределах от 10 до 100 кВт.

Установка оснащена системой обеспечения режима переменного нагрева путем изменения электрической мощности нагрева через тиристорный регулятор мощности по заданной программе. Система обеспечивает максимальный темп роста мощности от 0 до 100 % за время не более 1 с и любые меньшие темпы нагрева, требуемые по программе испытаний. Установка позволяет облучать образцы материалов и пакетов теплозащитных покрытий (ТЗП) тепловым потоком до 350 кВт/м² и обеспечивать нагрев поверхности образцов до 1000 °С за время, близкое к условиям применения на изделиях: от «крутых» до «пологих» темпов нагрева. Пакеты ТЗП и, соответственно, образцы могут быть многослойными. Образцы имеют размеры 50×50×*h* мм, где *h* — суммарная толщина пакета ТЗП. Порядок отношения $o(h/50) \approx 0,1$, поэтому в средней зоне образца реализуются тепловые режимы, близкие к режимам для неограниченной пластины. Схема варианта двухслойного образца приведена на рис. 3. Пакет ТЗП приклеивается к металлической подложке, сверху к пакету ТЗП плотно прижимается тонкая стальная пластина (крышка), которая экранирует образец от возможного проникновения излучения вглубь ТЗП. В крышку, между крышкой и ТЗП, между слоями ТЗП, между ТЗП и подложкой, в подложку устанавливаются термодатчики и термометры сопротивления с парным дублированием. Показания термодатчиков, установленных между крышкой и ТЗП, являются граничными условиями первого рода для прямой задачи теплопроводности. Подложка опирается на теплоизолятор, поэтому на границе подложки и теплоизолятора принимается условие адиабатичности, а металлическая подложка математически является слоем с бесконечной теплопроводностью на границе пакета ТЗП.

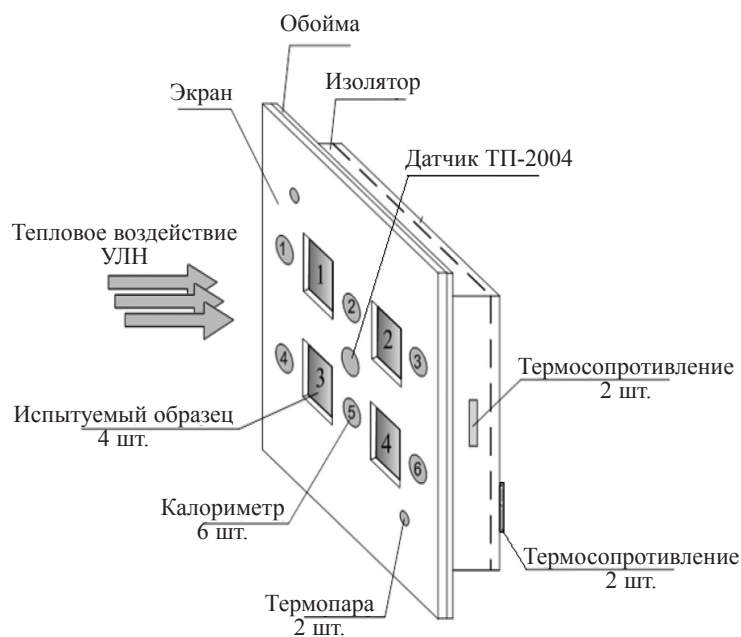


Рис. 2 . Схема кассеты с образцами.

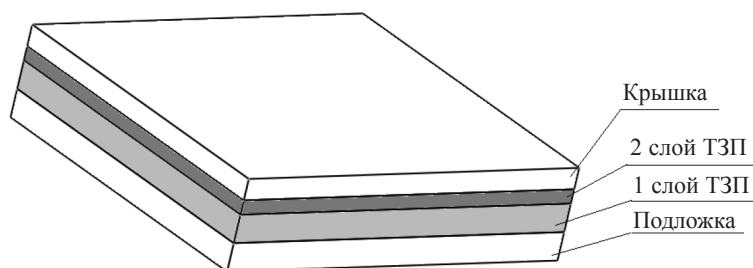


Рис. 3. Схема двухслойного образца.

Для диагностики изменения теплофизических характеристик материалов вследствие старения при их длительной эксплуатации в составе изделий в кассету вставляются одновременно состаренные образцы и образцы-свидетели, не прошедшие ускоренных испытаний. Могут испытываться образцы, изготовленные из ТЗП изделий, прошедших длительную эксплуатацию, при их дефектации. Достоверность данных по испытаниям и обеспечение задаваемых режимов испытаний подтверждаются контрольными измерениями. Образцы, калориметры и датчики теплового потока вставлены в теплоизолятор. Изолятор со всех сторон облицован стальными элементами: экран, обойма, подложка изолятора. Калориметры равномерно распределены по поверхности кассеты для подтверждения равномерности потока. Неравномерность не превышает погрешности средств измерения.

Значения ТФХ при нормальной температуре определяются стандартными методами, а для определения зависимостей ТФХ от температуры и темпов нагрева могут применяться различные методы. Обработка результатов измерений может проводиться на основе методов решения обратных задач теплопроводности [19, 20], которые в случае переменных темпов нагрева и переменных ТФХ являются достаточно сложными. При нелинейных темпах нагрева может использоваться также аппроксимационно-суперпозиционный метод решения задач теплопроводности [21—24]. Суть метода применительно к анализу результатов испытаний плоских образцов на установках типа УЛН представлена в работах [23, 24].

В случае неограниченной пластины уравнение теплопроводности при отсутствии внутренних тепловых источников и постоянном значении коэффициента температуропроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (8)$$

где T , τ , x , a — соответственно температура, время, поперечная координата с началом на поверхности и коэффициент теплопроводности.

При аппроксимации условий однозначности сложных задач теплопроводности известными простыми функциями, для которых имеются аналитические решения, можно выписать приближенное аналитическое решение для исходной сложной задачи [21—24]. В частности, сложные граничные условия (ГУ) могут быть аппроксимированы с допустимой погрешностью ступенчатой или ломаной линией. При анализе испытаний плоских образцов на УЛН задача сводится к сумме двух задач теплопроводности для неограниченной пластины с ГУ I-го рода на одной поверхности и ГУ II-го рода на другой поверхности. Первая задача — неограниченная пластина с измеренными в эксперименте ГУ I рода на поверхности, примыкающей к крышке, с нулевым тепловым потоком на поверхности, примыкающей к подложке, с начальной температурой по толщине ТЗП $T|_{\tau=0} = T_0$, вторая — неограниченная пластина с нулевым значением температуры $T_{00} = 0$ К на поверхности, примыкающей к крышке, нулевым начальным значением и с ГУ II рода на поверхности, примыкающей к подложке, рассчитанными по измеренным значениям температуры подложки:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = S(\tau) = S_{\text{ин}} + S_{\text{п}} - S_{\text{ап}} = -\varepsilon_{\text{п}} \sigma_0 (T_{\text{п}}^4 - T_{\text{с}}^4) - c'_p \rho' h' \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial \tau} - S_{\text{ап}}, \quad (9)$$

где c'_p , ρ' , h' — соответственно теплоемкость, плотность, толщина слоя бесконечной теплопроводности (металлической подложки); $T_{\text{п}}$, $T_{\text{с}}$ — измеренная температура подложки и температура стенок испытательного помещения (принималась равной начальной температуре); $\varepsilon_{\text{п}}$ — степень черноты подложки; σ_0 — постоянная Стефана—Больцмана; $S_{\text{ин}}$, $S_{\text{п}}$, $S_{\text{ап}}$ — соответственно теплоотвод излучением в подложку и в помещение за счет конвективного теплообмена. При закрытии подложки теплоизолятором (основная схема сборки) первым и третьим слагаемыми в правой части в (9) можно пренебрегать.

Если на поверхности $x = 0$ задано сложное ГУ I рода в виде кривой $T|_{x=0} = f(\tau)$, то кривая может быть аппроксимирована ломаной линией с N отрезками, при этом значения температуры поверхности T_i в моменты τ_i , $i = 0, 1, \dots, N$ равны $T_i = T|_{x=0, \tau=\tau_i} = f(\tau_i)$. Соответственно, решением уравнения (10) для первой задачи является сумма решений простых задач с линейным изменением ГУ, в одной из которых берется начальное условие (НУ) исходной задачи, а в других НУ равны нулю [21—24]:

$$T = T_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})]}{2} \cdot [\theta_i \cdot (b_i - b_{i-1})]; \quad (10)$$

$$\theta_i = F_{0i} - \eta + \frac{\eta^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cdot \cos[\mu_n (1 - \eta)] \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{0i}); \quad (11)$$

$$b_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}}; \quad F_{0i} = \frac{a(\tau - \tau_{i-1})}{h^2}; \quad \eta = \frac{x}{h}, \quad b_0 = \tau_0 = 0. \quad (12)$$

При аппроксимации переменного ГУ $S = S(\tau)$ второй задачи ступенчатой линией с N интервалами, на каждом из которых реализуется значение $S_i = \text{const}$, равное, например, среднеинтегральному значению S на этом интервале, решение имеет вид:

$$T = T_{00} + \frac{h}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})]}{2} \cdot [\theta_{ii} \cdot (S_i - S_{i-1})]; \quad (13)$$

$$\theta_{ii} = 1 - \eta_i - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin[\mu_n (1 - \eta_i)] \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{0i}) = \eta - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(\mu_n \eta) \cdot \exp(-\mu_n^2 F_{0i}), \quad (14)$$

$$F_{0i} = \frac{a(\tau - \tau_{i-1})}{h^2}, \quad S_0 = \tau_0 = T_{00} = 0.$$

Общее решение задачи (8) есть сумма решений (10) и (13):

$$T = T_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})]}{2} \cdot [\theta_i \cdot (b_i - b_{i-1})] + \frac{h}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{i-1})]}{2} \cdot [\theta_{li} \cdot (S_i - S_{i-1})], \quad (15)$$

где входящие в решение параметры рассчитываются по формулам (11), (12), (14).

Если интервалы аппроксимации таковы, что $Fo_{i+1} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2} \geq 0,9$, то из графиков работы [22] следует, что суммами рядов в (13) и (16) с погрешностью 15 % в моменты времени τ_i , $i = 1, 2, \dots, N$ можно пренебречь. При таких и еще больших значениях чисел Фурье решение (15) для любого узлового момента времени τ_k , $k = 1, 2, \dots, N$ принимает вид:

$$\begin{aligned} T|_{\tau=\tau_k} &= T_0 + \frac{h^2}{a} \sum_{i=1}^k \left(\frac{a(\tau_k - \tau_{i-1})}{h^2} - \eta + \frac{\eta^2}{2} \right) \cdot (b_i - b_{i-1}) + \frac{h\eta}{\lambda} \sum_{i=1}^k (S_i - S_{i-1}) = \\ &= T_0 + \sum_{i=1}^k (\tau_k - \tau_{i-1})(b_i - b_{i-1}) - \frac{h^2}{a} \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) \cdot (b_k - b_0) + \frac{h\eta(S_k - S_0)}{\lambda} = \\ &= T_{kk} - \frac{h^2}{a} \left(\eta - \frac{\eta^2}{2} \right) \cdot (b_k - b_0) + \frac{h\eta(S_k - S_0)}{\lambda}, \end{aligned} \quad (16)$$

где T_{kk} — температура поверхности слоя ТЗП в момент τ_k .

Как правило, ТФХ материалов при температурах 15 — 25 °С известны, а в интересах практики необходимо определять ТФХ в диапазоне температур эксплуатации материалов, которые в случае, например, теплозащитных материалов, могут быть высокими. Изменения ТФХ при нагреве могут быть существенными, но по значениям ТФХ при температурах 15 — 25 °С можно сделать оценку чисел Фурье и планировать длительность испытаний.

Для температуры на внутренней поверхности слоя ТЗП из (16) следует:

$$\begin{cases} T|_{\tau=\tau_k, \eta=1} = T_{ik} = T_{kk} - \frac{h^2}{2a} \cdot (b_k - b_0) + \frac{h(S_k - S_0)}{\lambda}; \\ T|_{\tau=\tau_{k+1}, \eta=1} = T_{ik+1} = T_{kk+1} - \frac{h^2}{2a} \cdot (b_{k+1} - b_0) + \frac{h(S_{k+1} - S_0)}{\lambda}, \end{cases}$$

откуда, учитывая, что в начальный момент $\tau_0 = 0$ значения $S_0 = b_0 = 0$, получим систему двух уравнений относительно искомым значениям ТФХ — коэффициента теплопроводности λ и удельной теплоемкости c_p :

$$\begin{cases} T_{kk} - T_{nk} - \frac{\rho h^2 b_k}{2\lambda} \cdot c_p + \frac{h S_k}{\lambda} = 0; \\ T_{kk+1} - T_{nk+1} - \frac{\rho h^2 b_{k+1}}{2\lambda} \cdot c_p + \frac{h S_{k+1}}{\lambda} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Умножая первое уравнение на b_{k+1} , второе — на b_k и вычитая их друг из друга, получим выражение для λ , а после подстановки этого выражения в любое из уравнений (17) — выражение для c_p :

$$\lambda = h \frac{S_k b_{k+1} - S_{k+1} b_k}{(T_{kk+1} - T_{nk+1}) b_k - (T_{kk} - T_{nk}) b_{k+1}}; c_p = \frac{2\lambda}{\rho h^2} \cdot \frac{(T_{kk+1} - T_{nk+1}) S_k - (T_{kk} - T_{nk}) S_{k+1}}{S_k b_{k+1} - S_{k+1} b_k}. \quad (18)$$

Задачей испытаний является получение средних эффективных значений λ и c_p на интервалах (τ_{k-1}, τ_{k+1}) , и результатом обработки испытаний является построение с использованием значений λ и c_p , получаемых по формулам (18), зависимостей вида:

$$\lambda = \lambda(\bar{T}_k, \bar{b}_k), \quad c_p = c_p(\bar{T}_k, \bar{b}_k), \quad \text{где } \bar{T}_k = \frac{\bar{T}_{k-1} + \bar{T}_k + \bar{T}_{k+1}}{3}, \quad \bar{b}_k = \frac{b_k + b_{k+1}}{2},$$

где $\bar{T}_k$ — средние по толщине образцов значения температуры в моменты τ_k , которые рассчитываются по формуле:

$$\bar{T}|_{\tau=\tau_k} = \bar{T}_k = T_{\kappa k} - \frac{5h^2}{6a} b_k + \frac{hS_k}{2\lambda}.$$

Обработка результатов проводится по интервалам (τ_0, τ_2) , (τ_1, τ_3) , ..., (τ_{N-2}, τ_N) .

По сравнению с ранее опубликованными приложениями данного метода на настоящем этапе учитывается то, что значения чисел Фурье в выражениях (11) и (14) при переменном по времени коэффициенте температуропроводности $a(\tau)$ в текущие моменты времени могут быть представлены в виде:

$$Fo_i = \frac{1}{h^2} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau} a(\tau) d\tau = \frac{a_{\text{ср}i}(\tau - \tau_{i-1})}{h^2},$$

где $a_{\text{ср}i}$ — среднеинтегральное на интервале $[\tau_{i-1}, \tau]$ значение коэффициента температуропроводности [22].

Представленный выше инженерный аналитический метод решения обратной задачи теплопроводности по определению эффективных значений теплофизических характеристик материалов: коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости — в зависимости от темпов нагрева и среднеинтегральных по толщине ТЗП значений температуры использовался при обработке испытаний теплозащитных материалов. В числе других испытаний были проведены испытания двухслойных образцов углепластикового материала суммарной толщиной ~ 6 мм с целью определения ТФХ при динамическом нагреве.

На рис. 4 приведен пример графиков измерений температуры на различных глубинах образца, изготовленного по схеме рис. 3, и результатов расчетов температуры с использованием ТФХ, полученных по изложенному методу. При относительно низких температурах (от 15—

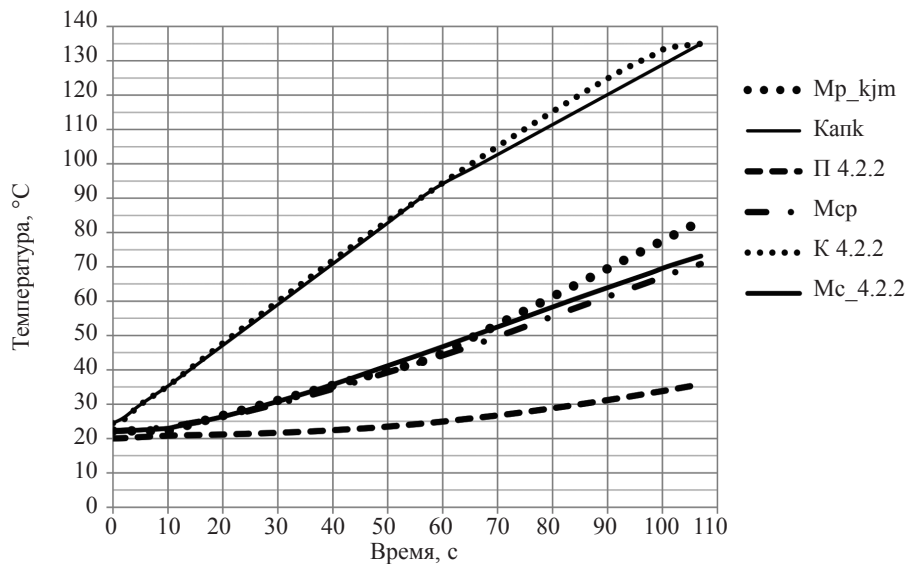


Рис. 4. Результаты измерений и расчетов температур образца углепластикового материала: Mp_kjm — расчет по аппроксимационно-суперпозиционному методу; $Kank$ — кусочно-линейная аппроксимация температуры крышки; $П\ 4.2.2$ — измеренная температура между ТЗП и подложкой; Msp — численный расчет температуры между подслоями ТЗП с использованием полученных ТФХ; $К\ 4.2.2$ — измеренная температура крышки; $Mc_4.2.2$ — измеренная температура между слоями.

25 °С до начала разложения связующего) ТФХ углепластикового материала примерно равны: $\lambda = 0,5\text{—}0,8$ Вт/мК; $c_p = 900\text{—}1100$ Дж/кгК; $\rho = 1300\text{—}1400$ кг/м³. Оценки чисел Фурье с использованием этих данных показали, что при толщине слоя ТЗП испытанного образца 6 мм условие $Fo_{i-li} = \frac{a(\tau_i - \tau_{i-1})}{h^2} \geq 0,9$ выполняется при длительности интервалов $(\tau_i - \tau_{i-1})^3$ 53—111 с, и при

анализе испытания было выделено два интервала, на которых это условие выполнялось. Из рис. 4 видно, что использование полученных ТФХ дает хорошее согласование рассчитанных и измеренных значений температуры между подслоями ТЗП.

ВЫВОДЫ

Представлен метод синхронного расчета тепловлажностных режимов и изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов, что позволяет при известных циклограммах тепловлажностного воздействия на изделия оценивать, достигнут ли критический предел изменения свойств материалов систем и элементов конструкции изделия, или, после подтверждающего комплекса УКИ в совокупности с другими испытаниями, в том числе и с использованием методов дефектоскопии, срок эксплуатации можно продлить. В частности, в обеспечение принятия такого решения может быть использован представленный в работе метод экспериментально-аналитического прогнозирования теплофизических характеристик теплозащитных материалов при переменных темпах нагрева по результатам тепловых испытаний образцов на установке лучистого нагрева с применением при анализе результатов испытаний аппроксимационно-суперпозиционного метода для решения обратной задачи теплопроводности. Метод синхронного расчета тепловлажностных режимов и изменения теплофизических и влагофизических свойств материалов может быть использован и при анализе результатов ускоренных климатических испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларионов В.В., Лидер А.М., Долматов Д.О., Седнев Д.А. Ультразвуковой контроль дефектов металлических изделий сложной формы // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 31—36.
2. Степанова Л.Н., Чернова В.В., Рамазанов И.С. Акустико-эмиссионный контроль раннего зарождения дефектов в образцах из углепластика при статическом и тепловом нагружении // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 12—23.
3. Вапиров Ю.М., Голован В.И., Дзюба А.С., Колесник К.А., Щербаков В.Н. Способ определения и прогнозирования влагопоглощения полимерными композиционными материалами при старении // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. XLVII. № 7. С. 66—76.
4. Запорожан Д.Ю., Канатов А.В., Кулаков А.А., Челомов А.А. Оценка разрушающего влияния агрессивных сред на процесс старения композитных материалов // Химическая технология и экология технологических процессов. Дизайн и технологии. 2023. № 96 (138). С. 57—62.
5. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия АлтГУ. Физика. 2020. № 1 (111). С. 41—51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06
6. Свердюк В.В., Трушкина Т.В. Анализ свойств тонкослойных покрытий, полученных ручным воздушным и автоматизированным безвоздушным методами до и после ускоренных климатических испытаний. Красноярск: Технологии ракетостроения, 2021. С. 263.
7. Севостьянов П.А., Белевитин А.А., Бурдин И.М. Марковская модель процессов релаксации и старения волокнистых материалов // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2023. № 1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8126
8. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам. Часть 1. Испытания новых материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). С. 114—122. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122
9. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам. Часть 2. Основные тенденции // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). С. 99—108. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108
10. Брянский А.А., Башков О.В., Малышева Д.П. Исследование термоокислительного старения полимерного композиционного материала с использованием метода акустической эмиссии // Природные ресурсы арктики и субарктики. 2021. Т. 26. № 3. С. 155—168. DOI: 10.31242/2618-9712-2021-26-3-155-168
11. Кутыинов В.Ф., Киреев В.А., Старцев О.В., Шевалдин В.Н. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композитных материалов // Ученые записки ЦАГИ. 2006. Т. XXXVII. № 4. С. 54—64.

12. *Куприянов В.Н., Иванцов А.И.* Тепловое старение полимерсодержащих теплоизоляционных материалов в наружных стенах // *Архитектура и строительство. Эксперт: теория и практика.* 2020. № 3 (6). С. 31—36. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10022
13. *Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Антипов В.В., Дуонова В.А.* Методические вопросы исследования эффективности противокоррозионной защиты, применяемой в изделиях авиационной техники // *Труды ВИАМ.* 2024. № 1 (131). С. 78—91. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91
14. *Дубровина Н.Н., Елиневский А.К., Костин Г.Ф., Новиков А.И., Хлыбов В.И.* Совместный расчет тепловлажностных режимов изделий с учетом изменения свойств материалов при длительных сроках хранения и эксплуатации / II Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы». Геленджик. 15—17 июля 2015. М.: ВИАМ, 2015.
15. *Дегтярь В.Г.* Применение композиционных материалов в разработках Государственного ракетного центра «КБ им. Академика В. П. Макеева» // *Конструкции из композиционных материалов.* 2004. № 1. С. 17—23.
16. *Костин Г.Ф., Калашников С.Т., Савельев В.Н., Захарьевич Д.А., Таскаев С.В., Хлыбов В.И., Швалева Р.К.* Методика и результаты оценки изменения теплофизических характеристик углепластика на основе фенолформальдегидного связующего при нагреве и разложении // *Конструкции из композиционных материалов.* 2018. № 4. С. 63—70.
17. *Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.* Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
18. *Несмелов В.В.* Влияние темпа нагрева на характеристики теплопереноса при термической деструкции фенольного углепластика // *Физика горения и взрыва.* 1993. Т. 29. № 6. С. 53—58.
19. *Алифанов О.М., Черепанов В.В.* Методы исследования и прогнозирования свойств высокопористых теплозащитных материалов. М.: МАИ, 2014. 264 с.
20. *Туголуков Е.Н., Карпук В.А., Рухов А.В.* Решение обратных задач теплопроводности для многослойных тел канонической формы // *Вестник ТГТУ.* 2013. Т. 19. № 3. С. 577—583.
21. *Усов А.Т.* Приближенные методы расчета температур нестационарно нагреваемых твердых тел простой формы. М.: Машиностроение, 1973. 108 с.
22. *Пехович А.И., Жидких В.М.* Расчеты теплового режима твердых тел. М.: Энергия, 1976. 352 с.
23. *Костин Г.Ф., Калашников С.Т., Гусев В.В., Решетников Н.А., Тукачева Т.В.* Применение аппроксимационно-суперпозиционного метода для восстановления теплофизических характеристик материалов по результатам тепловых испытаний // *Конструкции из композиционных материалов.* 2019. № 1. С. 37—42.
24. *Костин Г.Ф., Калашников С.Т., Гусев В.В.* Инженерный аналитический метод определения теплофизических характеристик материалов по результатам тепловых испытаний // *Конструкции из композиционных материалов.* 2021. № 3 (163). С. 39—48.

REFERENCES

1. *Larionov V.V., Lider A.M., Dolmatov D.O., Sednev D.A.* Ultrasonic inspection of defects in metal products of complex shape // *Defectoskopiya.* 2021. No. 5. P. 31—36 (in Russian).
2. *Stepanova L.N., Chernova V.V., Ramazanov I.S.* Acoustic emission control of early nucleation of defects in carbon fiber samples under static and thermal loading // *Defectoskopiya.* 2020. No. 10. P. 12—23 (in Russian).
3. *Vapiron Yu.M., Golovanov V.I., Dzyuba A.S., Kolesnik K.A., Shcherbakov V.N.* Method for determining and predicting moisture absorption by polymer composite materials during aging // *TSAGI Science Journal.* 2016. V. XLVII. No. 7. P. 66—76 (in Russian).
4. *Zaporozhan D.Yu., Kanatov A.V., Kulakov A.A., Chelomov A.A.* Assessment of the destructive effect of aggressive media on the aging process of composite materials. Chemical technology and ecology of technological processes // *Design and technology.* 2023. No. 96 (138). P. 57—62 (in Russian).
5. *Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K.* Aging of polymer composites in extremely cold climates // *Izvestiya of Altai State University. Physics.* 2020. No. 1 (111). P. 41—51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06 (in Russian).
6. *Sveredyuk V.V., Trushkina T.V.* Analysis of the properties of thin-layer coatings obtained by manual air and automated airless methods before and after accelerated climatic tests. Krasnoyarsk: Rocket science technologies, 2021. P. 263 (in Russian).
7. *Sevostyanov P.A., Belevitin A.A., Burdin I.M.* Markov model of relaxation and aging processes of fibrous materials // *Elektronny nauchny zhurnal "Inzhenerny vestnik Dona".* 2023. No. 1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8126 (in Russian).
8. *Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V.* Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1 // *Testing of new materials. Proceedings of VIAM.* 2021. No. 1 (95). P. 114—122. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122 (in Russian).
9. *Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V.* Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 2. Main trends // *Proceedings of VIAM.* 2021. No. 2 (96). P. 99—108. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108 (in Russian).

10. *Bryansky A.A., Bashkov O.V., Malysheva D.P.* Investigation on thermooxidative aging of the polymer composite material by acoustic emission // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021. V. 26. No. 3. P. 155—168. DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-155-168 (in Russian).
11. *Kutyinov V.F., Kireev V.A., Startsev O.V., Shevaldin V.N.* Influence of climatic aging on the elasticity and strength characteristics of polymer composite materials // *TSAGI Science Journal*. 2006. V. XXXVII. No. 4. P. 54—64 (in Russian).
12. *Kupriyanov V.N., Ivantsov A.I.* Thermal aging of polymer-containing thermal insulation material in exterior walls // *Architecture and construction. Expert: theory and practice*. 2020. No. 3 (6). P. 31—36. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10022 (in Russian).
13. *Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Antipov V.V., Duyunova V.A.* Methodological issues of the study of the effectiveness of anticorrosive protection used in aircraft products // *Proceedings of VIAM*. 2024. No. 1 (131). P. 78—91. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91 (in Russian).
14. *Dubrovina N.N., Elinevsky A.K., Kostin G.F., Novikov A.I., Khlybov V.I.* Joint calculation of heat and humidity conditions of products taking into account changes in the properties of materials during long periods of storage and operation / *Vserossiyskaya nauchno-texnicheskaya konferenciya "Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya korrozii i stareniya materialov v klimaticheskikh usloviyax: problemy i perspektivy"*. Gelendzhik. July 15—17, 2015. M.: VIAM, 2015 (in Russian).
15. *Degtiar V.G.* Use of composite materials in the Makeyev SRC developments // *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2004. No. 1. P. 17—23 (in Russian).
16. *Degtiar V.G., Kostin G.F., Kalashnikov S.T., Savelyev V.N., Zakharievich D.A., Taskaev S.V., Khlybov V.I., Shvaleva R.K.* Methodology and results of evaluation of variants in thermal and physical characteristics of a carbon fiber composite on the basis of a phenol-formaldehyde binding agent under heating and decomposition // *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2018. No. 4. P. 63—70 (in Russian).
17. *Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B.* Thermal protection. M.: Energiya, 1976. 392 p. (in Russian).
18. *Nesmelov V.V.* Influence of the heating rate on the characteristics of heat transfer during thermal destruction of phenolic carbon fiber // *Fizika gorennya i vzryva*. 1993. V. 29. No. 6. P. 53—58 (in Russian).
19. *Alifanov O.M., Cherepanov V.V.* Methods of research and forecasting properties of highly porous heat-protective materials. M.: MAI, 2014. 264 p. (in Russian).
20. *Tugolukov E.N., Karpuk V.A., Rukhov A.V.* Solution of inverse problems of thermal conductivity for multilayer bodies of canonical form // *TSTU Journal*. 2013. V. 19. No 3. P. 577—583 (in Russian).
21. *Usov A.T.* Approximate methods for calculating the temperatures of unsteady heated solids of simple shape. M.: Mashinostroyeniye, 1973. 108 p. (in Russian).
22. *Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M.* Calculations of the thermal regime of solids. M.: Energiya, 1976. 352 p. (in Russian).
23. *Kostin G.F., Kalashnikov S.T., Gusev V.V., Reshetnikov N.A., Tukacheva T.V.* Applying an approximation-superposition method to recover thermal and physical properties of materials under results of thermal testing // *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2019. No. 1. P. 37—42 (in Russian).
24. *Kostin G.F., Kalashnikov S.T., Gusev V.V.* Engineering analytical method to define thermal and physical properties of materials under results of thermal testing // *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2021. No. 3 (163). P. 39—48 (in Russian).

ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ ДВУХПАРАМЕТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2024 г. М.В. Сясько^{1,*}, И.П. Соловьев^{1,**}, П.В. Соломенчук^{2,***}

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, Россия 199034 Санкт-Петербург,
Университетская наб., 7/9

²ООО «КОНСТАНТА», Россия 198095 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
E-mail: *m.syasko@gmail.com; **i.soloviev@spbu.ru; ***pavel257@mail.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024; после доработки 16.05.2024

Принята к публикации 17.05.2024

Приведено описание принципов работы и исследования точности установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия, предназначенной для проведения автоматической градуировки толщиномера покрытий с использованием большого числа градуировочных точек. Описана процедура градуировки толщиномера покрытий, учитывающая особенности конструкции и способы компенсации основных источников погрешности установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия.

Ключевые слова: вихретоковый, толщиномер, градуировка, точность.

TECHNIQUE FOR AUTOMATIC GRADUATION AND VERIFICATION OF TWO-PARAMETER EDDY-CURRENT THICKNESS GAUGES OF DIELECTRIC COATINGS

© 2024 M.V. Syasko^{1,*}, I.P. Soloviev^{1,**}, P.V. Solomenchuk^{2,***}

¹St. Petersburg State University, Russia 199034 St. Petersburg, University embankment, 7/9

²JSC «CONSTANTA», Russia 198095 St. Petersburg, Ogorodniy pereulok, 21
E-mail: *m.syasko@gmail.com; **i.soloviev@spbu.ru; ***pavel257@mail.ru

The article describes the non-conductive coating thickness simulating system, designed for automatic graduation of the coating thickness gauge using a large number of graduation points. The accuracy of the non-conductive coating thickness simulating system has been evaluated. The procedure for graduation of the coating thickness gauge is described, taking into account the design features and ways to compensate for the main sources of errors of the non-conductive coating thickness simulating system.

Keywords: eddy-current, thickness gauge, graduation, accuracy.

DOI: 10.31857/S0130308224060069

Для измерения толщины диэлектрических покрытий (T_n), например, лакокрасочных или анодноокисных, на немагнитных металлических основаниях применяются вихретоковые толщиномеры покрытий, реализующие амплитудный метод [1], которые во многом не удовлетворяют современным требованиям к погрешности измерений. В частности, имеется зависимость показаний от величины удельной электрической проводимости σ основания объекта контроля. Для компенсации этой зависимости представляет интерес использование амплитудно-фазового вихретокового преобразователя (ВТП) и методики обработки (анализа) действительной и мнимой составляющих сигнала $\dot{U}(T_n, \sigma)$ ВТП на комплексной плоскости с применением алгоритма двухмерной градуировки [2]. Градуировочная характеристика толщиномера, реализующего двухпараметровый метод измерения, представляет собой веерообразную сетку $\dot{U}(T_n, \sigma)$ на комплексной плоскости (рис. 1).

При проведении измерений T_n , в соответствии с алгоритмом обработки измерительной информации, описанном в [2], обеспечивается учет и подавление влияния σ . Однако для реализации алгоритма необходима градуировочная таблица с большим набором градуировочных точек (порядка нескольких тысяч), которые необходимо снимать на наборе образцовых оснований (ОО), перекрывающих диапазон актуальных значений σ в диапазоне от 1 до 60 МСм/м, что делает ручную процедуру градуировки с использованием мер толщины покрытия практически не выполнимой. Для устранения этих проблем предлагается использовать установку-имитатор толщины диэлектрического покрытия (УИТП), внешний вид и состав которой приведен на рис. 2.

На рис. 3 изображена структурная схема УИТП. При проведении градуировки ОО укладывается в ложемент. Производится перемещение ОО вниз до момента его касания с контактной по-

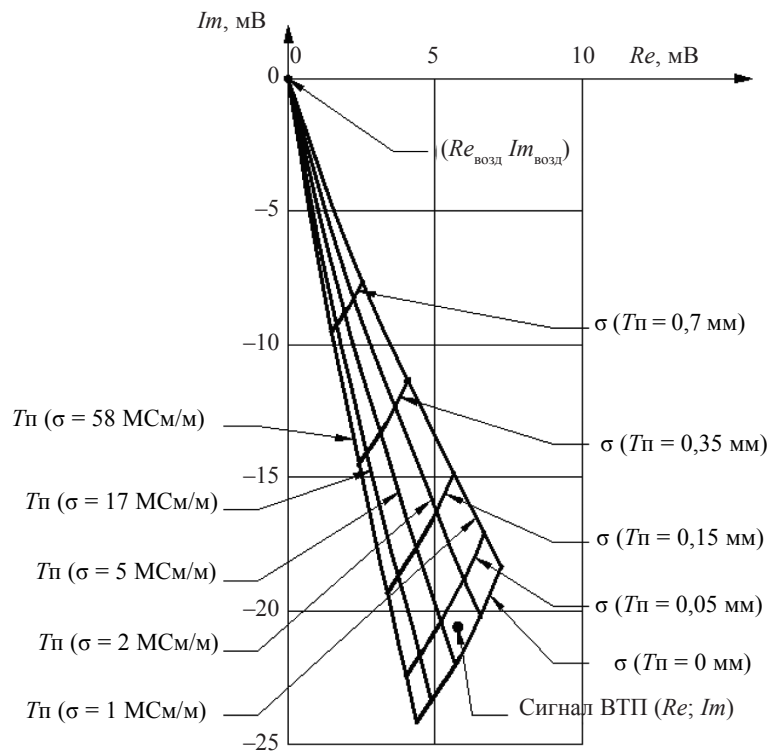


Рис. 1. Пример расчета годографов сигнала $\dot{U}(T_p, \sigma)$ для конечно-элементной модели трехобмоточного трансформаторного скомпенсированного амплитудно-фазового ВТП [2].

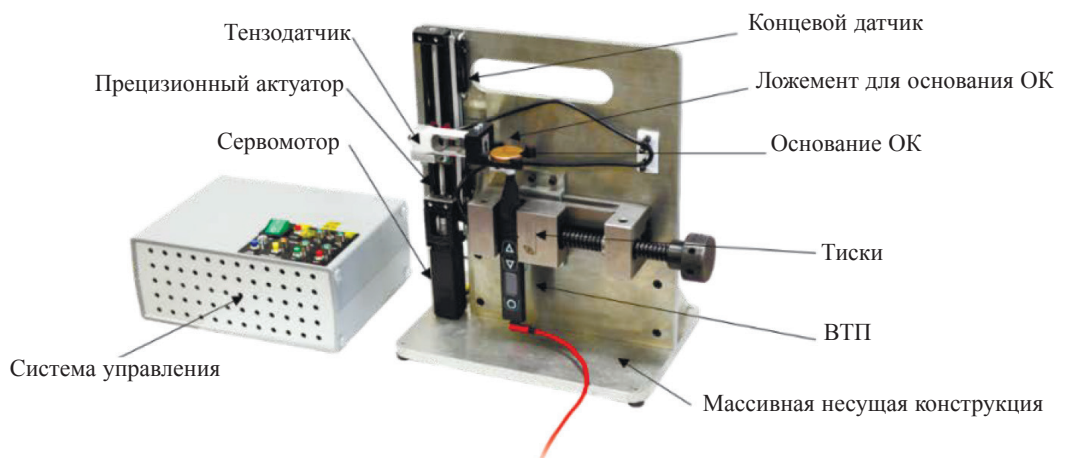


Рис. 2. Внешний вид установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия.

верхностью ВТП. Определение момента касания производится с использованием сигнала, сформированного тензодатчиком, соответствующего $T_p = 0$. После этого производится ступенчатое перемещение ОО вверх по управляющей программе, имитирующей задание T_p . Считывание сигнала ВТП (Im, Re) и запись в градуировочную таблицу производится во время остановки по сигналу достижения заданной позиции (T_{pi}), сформированному серводрайвером. При достижении ОО положения, соответствующего пределу измерения T_{pmax} , производится замена ОО вручную на следующее, имеющее другое значение σ , после чего цикл повторяется для каждого ОО.

Сигнал тензодатчика подается на усилитель, содержащий абсолютный и дифференциальный каналы с логическими выходами. В процессе градуировки микроконтроллер толщиномера производит не только обработку сигналов с выхода измерительного преобразователя, но и тактирует работу всех элементов УИТП.

В рамках испытаний были определены основные источники погрешности задания (выставления) толщины покрытия, определяемые конструкцией УИТП:

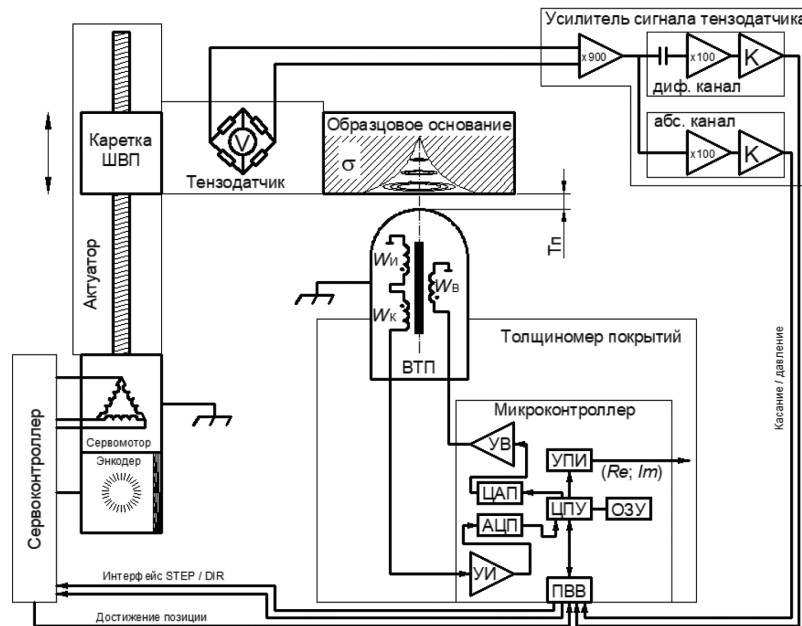


Рис. 3. Структурная схема установки-имитатора толщины покрытия и измерительного преобразователя толщиномера.
 $W_{и}$, $W_{к}$ и $W_{в}$ — измерительная, компенсационная и возбуждающая обмотки ВТП.

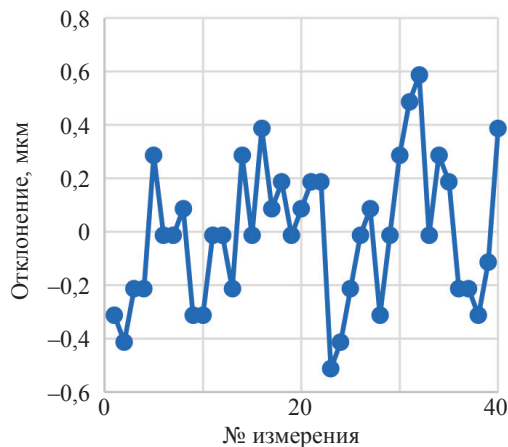


Рис. 4. Погрешность выставления нуля в процессе многократных измерений.

- система выставления нуля, включающая в себя тензодатчик;
- гистерезис перемещения ОО, обусловленный конструкцией актуатора;
- дифференциальная нелинейность шарикововинтовой передачи (ШВП) актуатора.

Исследование прецизионности выставления нуля производилось путем многократных выставлений нуля (рис. 4). Прецизионность выставления нуля характеризуется размахом 1,1 мкм и СКО порядка 0,2 мм.

Компенсация отклонения выставления нуля проводится путем определения фактического положения нуля с помощью анализа тренда амплитуды сигнала ВТП средствами программного обеспечения толщиномера во время проведения градуировки.

Исследование и компенсация погрешности, определяемой гистерезисом перемещения образцового основания, осуществлялись с использованием инкрементного цифрового преобразователя линейных перемещений Sylcom P12D HR (P12D) путем сравнения заданного положения с измеренным (рис. 5).

Погрешность выставления положения, определяемая гистерезисом, составляет 4 мкм, гистерезис наблюдается при движении вверх до 15 мкм, при движении вниз — до 40 мкм. Компенсация этой погрешности производится путем выбора гистерезиса (люфта) в процессе градуировки перед началом записи точек градуировочной характеристики и сохранением монотонности движения в течение проведения процедуры выставления точек градуировочной характеристики.

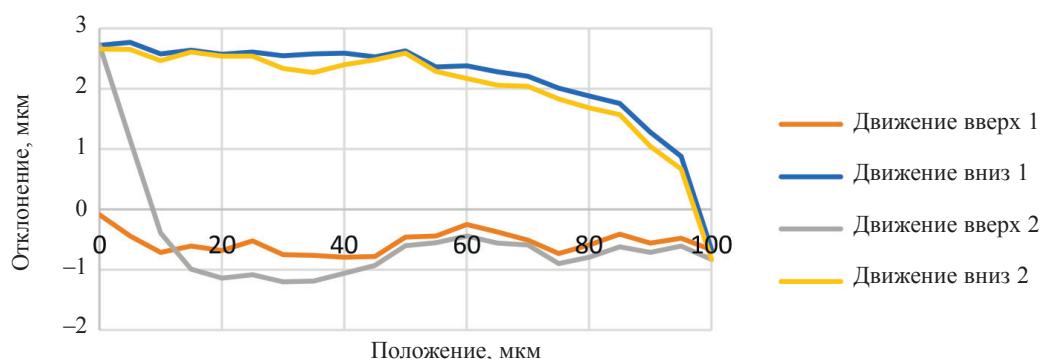


Рис. 5. Гистерезис перемещения образцового основания.

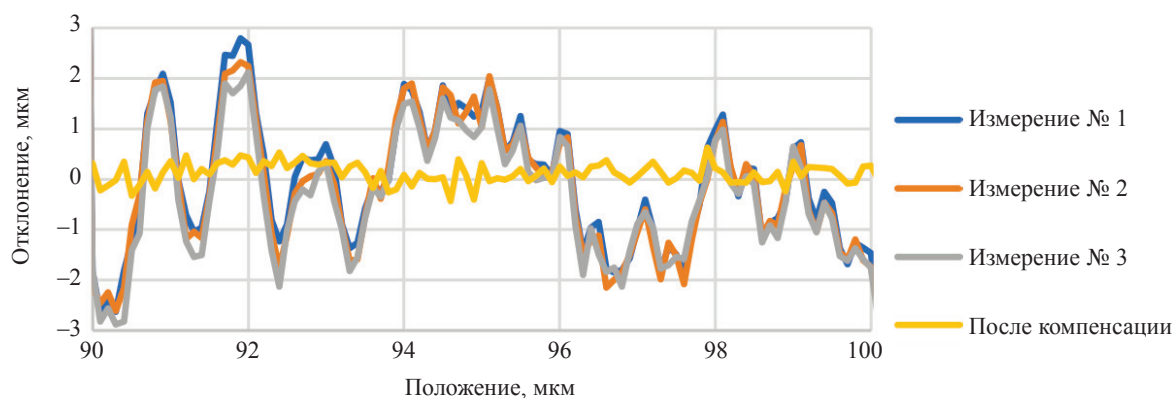


Рис. 6. Дифференциальная нелинейность актуатора и ее компенсация.

Исследование дифференциальной нелинейности актуатора проводилось с использованием инкрементного преобразователя линейных перемещений P12D (рис. 6).

Погрешность выставления положения, определяемая дифференциальной нелинейностью актуатора, превышает ± 3 мкм. Компенсация погрешности, определяемой дифференциальной нелинейностью актуатора, производится путем картирования винта ШВП (Screw mapping), при котором в память толщиномера вводится поправка, учитывающая его нелинейность. В процессе градуировки программа толщиномера определяет актуальное положение ОО относительно вала ШВП актуатора и компенсирует его дифференциальную нелинейность. На рис. 6 показана зависимость отклонения от положения ОО относительно вала ШВП до и после компенсации указанной погрешности.

Учитывая перечисленные составляющие погрешности, а также механизм их возникновения, была построена процедура градуировки толщиномера с использованием УИТП, временная диаграмма которой приведена на рис. 7.

Процедура градуировки предусматривает: 1) установку ОО; 2) подведение ОО в крайнее положение (получение сигнала от концевого датчика); 3) грубое выставление нуля; 4) точное выставление нуля по сигналу касания от тензодатчика; 5) выбор гистерезиса перемещения ОО; 6) начало ступенчатого изменения толщины покрытия (п. 6б — отрыв от контактной поверхности ВТП); 7) снятие градуировочных точек первой части диапазона измерения толщины покрытия с малым шагом; 8) снятие градуировочных точек второй и последующих частей диапазона измерения толщины покрытия с грубым шагом; 9) отвод ОО от ВТП; 10) замена ОО на следующее.

Поверка толщиномера производится аналогичным образом со следующими отличиями: используя универсальный последовательный интерфейс УПИ (интерфейс USB режим VCP) толщиномер подключается к компьютеру. В процессе поверки толщиномер передает в терминальную программу результаты измерений. Используя заготовленную форму обработки данных в программе Excel, формируется протокол поверки, производится расчет погрешности измерения и дается рекомендация о признании толщиномера годным или негодным к эксплуатации.

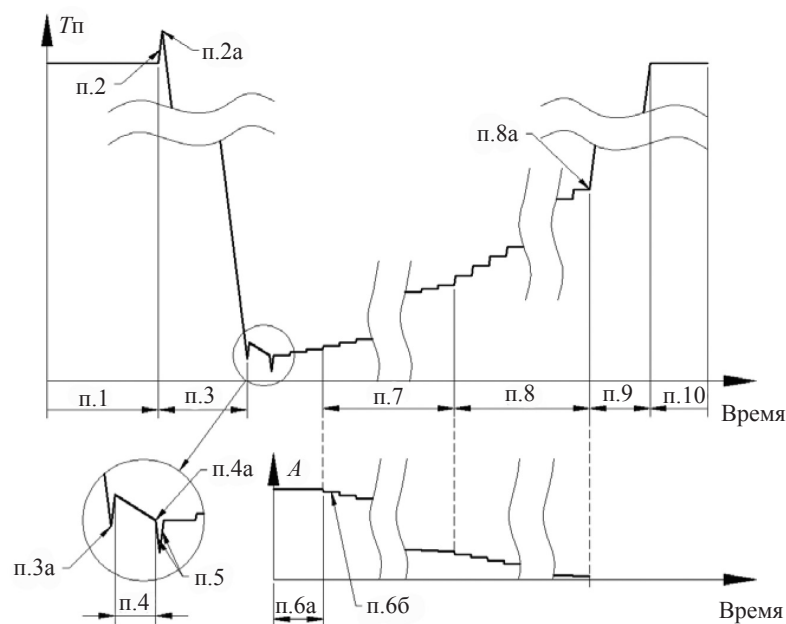


Рис. 7. Временная диаграмма процедуры градуировки толщиномера покрытий.

ВЫВОДЫ

Разработанная, изготовленная и исследованная установка-имитатор толщины диэлектрических покрытий, подключаемая к градуируемому толщиномеру с использованием двунаправленного интерфейса, реализует технологию автоматической градуировки вихретоковых толщиномеров с обеспечением метрологических характеристик, соответствующих современным требованиям производств, с отстройкой от влияния удельной электрической проводимости основания. Также предложена технология автоматизированной поверки указанных толщиномеров, обеспечивающая требования стандарта ГОСТ Р ИСО 2360—2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 2360—2021 Неэлектропроводящие покрытия на немагнитных электропроводящих металлических основаниях. Измерение толщины покрытия. Амплитудный вихретоковый метод.
2. Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N. A technique for multi-parameter signal processing of an eddy-current probe for measuring the thickness of non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5144. <https://doi.org/10.3390/app13085144>

REFERENCE

1. GOST R ISO 2360—2021 Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals. Measurement of coating thickness. Amplitude-sensitive eddy-current method.
2. Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N. A technique for multi-parameter signal processing of an eddy-current probe for measuring the thickness of non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5144. <https://doi.org/10.3390/app13085144>

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО РЕЗУЛЬТАТА ДЛЯ МАГНИТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

© 2024 г. С.Г. Сандомирский^{1,*}

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
Беларусь 220072 Минск, Академическая, 12
E-mail: ^{*}sand_work@mail.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024; после доработки 25.05.2024
Принята к публикации 31.05.2024

Внутренний коэффициент N_i размагничивания возникает в ферромагнитном материале вследствие механических напряжений и неоднородностей в его структуре и достоверно характеризует ее изменения. Но для определения N_i проводят цикл многочисленных магнитных воздействий на материал и прецизионных измерений его намагниченности для построения безгистерезисной кривой намагничивания. Это усложняет и снижает точность определения N_i .

В статье для упрощения определения безгистерезисной кривой намагничивания материала и его N_i на основании достоверных физических предпосылок математически точно разработаны формулы, использующие результаты измерения его намагниченности технического насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы, которые могут быть измерены по стандартным методикам с минимальными погрешностями. Они использованы для анализа влияния температуры отпуска и твердости HRC стали 30 на ее N_i .

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, неразрушающий магнитный контроль структуры, безгистерезисное намагничивание, внутренний коэффициент размагничивания, коэрцитивная сила, намагниченность технического насыщения, остаточная намагниченность.

MODELLING OF THE ANHYSTERETIC MAGNETIZATION CURVE OF FERROMAGNETIC MATERIAL AND THE POSSIBILITY OF USING ITS RESULT FOR MAGNETIC STRUCTURAL ANALYSIS

© 2024 S.G. Sandomirski^{1,*}

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk 220072 Belarus
E-mail: ^{*}sand_work@mail.ru

The internal demagnetization coefficient N_i occurs in ferromagnetic material due to mechanical stresses and inhomogeneity in its structure and reliably characterizes its changes. But to determine N_i , a cycle of numerous magnetic effects on the material and precision measurements of its magnetization is carried out to construct an anhysteretic magnetization curve. This complicates and reduces the accuracy of N_i determination.

In the article, to simplify the determination of the anhysteretic magnetization curve of a material and its N_i on the basis of reliable physical assumptions, mathematically precise formulas are developed using the results of measurements of its technical saturation magnetization, remanent magnetization and coercive force, which can be measured by standard techniques with minimum errors. They are used to analyze the effect of tempering temperature and hardness HRC of steel 30 on its N_i .

Keywords: ferromagnetic materials, nondestructive magnetic control of structure, anhysteretic magnetization, internal magnetization factor, coercive force, saturation magnetization, remanent magnetization.

DOI: 10.31857/S0130308224060077

ВВЕДЕНИЕ

Безгистерезисное намагничивание материала [1—5] заключается в действии на него постоянным намагничивающим полем напряженностью H и переменным магнитным полем, доводящим материал до технического насыщения. После этого амплитуду переменного поля плавно уменьшают до нуля. Полученная кривая безгистерезисного намагничивания относится к кривым основных состояний, которые при заданных условиях обладают наименьшей свободной энергией, то есть термодинамически наиболее устойчивы [3]. Она имеет большую крутизну в слабых полях и не имеет точки перегиба. По тангенсу угла α ее наклона к оси ординат в точке $H = 0$ (рис. 1) определяют внутренний коэффициент N_i размагничивания материала, который возникает вследствие напряжений и неоднородностей в его структуре. Поэтому N_i материала позволяет достоверно судить об изменениях его структуры и механических свойств [2, 6, 7]. Этим обусловлена важность его определения для ферромагнитных материалов [7—13].

Необходимость многочисленных магнитных воздействий на термически размагниченный (по требованию [4, п. 37]) материал и измерений его намагниченности со статистической об-

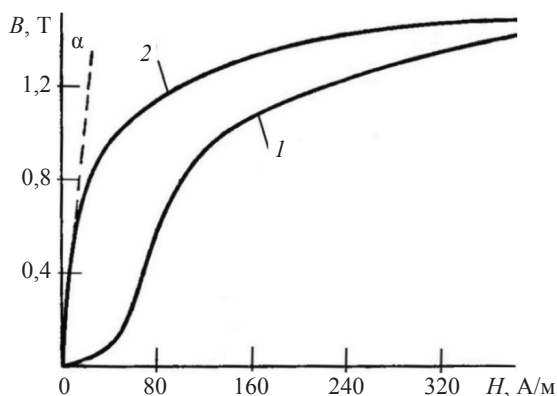


Рис. 1. Основная (1) и безгистерезисная (2) кривые намагничивания технически чистого железа [1].

работкой их результатов и дифференцированием полученной зависимости усложняют и снижают точность определения N_i . Между тем в [14] показано, что все «специфические» изменения петлей магнитного гистерезиса, магнитных проницаемостей, релаксационных и других магнитных параметров сталей, связанные с изменениями их структурного состояния, обусловлены только происходящими при этом изменениями коэрцитивной силы H_c , остаточной намагниченности M_r и намагниченности M_s технического насыщения этих сталей, которые могут быть измерены по стандартным методикам [15] с минимальными по сравнению с другими магнитными параметрами относительными погрешностями δ . При соблюдении требований [15] δ измерения H_c не превышает $\pm 2\%$, M_s и M_r — $\pm 3\%$, а δ измерения отношения $K_r = M_r/M_s$ (коэффициента прямоугольности — «rectangularity factor») при измерении M_s и M_r на одной и той же аппаратуре не превышает $\pm 1\%$ (погрешности определения площади сечения и постоянной гальванометра в этом случае исключаются) [16].

Цель статьи — установление связи безгистерезисной кривой намагничивания и внутреннего коэффициента N_i размагничивания ферромагнитного материала с основными магнитными параметрами предельной петли его магнитного гистерезиса (H_c , M_s и M_r), использование установленных связей для магнитного структурного анализа.

Для **моделирования безгистерезисной кривой намагничивания** магнитного материала используем то, что она близка к средней линии горизонтальных хорд его предельной петли гистерезиса [1, 7, 10]. Погрешность ее определения при таком подходе на начальном участке не превышает $\pm 3\%$ [7]. Методика [17] использует так же многократно подтвержденные аппроксимации зависимостей изменения намагниченности M материала от намагничивающего поля H на нисходящей (1) и восходящей (2) ветвях предельной петли его магнитного гистерезиса формулами Фрелиха:

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_c)}{M_s H_c + M_r H}, \quad (1)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H}, \quad (2)$$

использование которых для описания изменения намагниченности M ферромагнитного материала во втором квадранте плоскости (M, H) обосновано в [18, 19]. Так, проверка [19] формулы, полученной Р.И. Янусом в [18] на основании формулы (1) для расчета остаточной намагниченности ферромагнитного тела, показала совпадение результатов расчетов и проведенных разными авторами экспериментов для образцов разных размеров (центральный коэффициент N размагничивания образцов изменялся от 0,00118 до 0,222) и форм (эллипсоид, цилиндр, параллелепипед, пластина) из конструкционной стали и сталей 60C2A, 50PA и ШХ15, прошедших разную термическую обработку.

Намагниченности M на нисходящей и восходящей ветвях предельной петли магнитного гистерезиса соответствуют значения H_1 и H_2 намагничивающего поля (рис. 2).

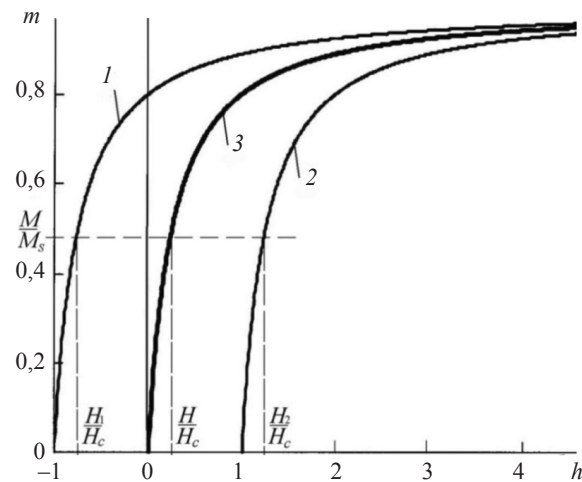


Рис. 2. Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви петли магнитного гистерезиса материала с $K_r = 0,8$ и безгистерезисная кривая намагничивания (3), построенные по формулам (1), (2), (4).

Их полусумма (с учетом знака) равна напряженности поля H на безгистерезисной кривой намагничивания (см. рис. 2). Проведя преобразования, получили [17]:

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r) + M_r H}. \quad (3)$$

Введя обозначения $m = M/M_s$, $h = H/H_c$, $K_r = M_r/M_s$ и преобразуя (3), получим:

$$m = [1 + (1 - K_r)/hK_r]^{-1}. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) получены математически точно на основании экспериментально обоснованных методики [1, 7] и зависимостей (1) и (2).

На их основании получим для N_i ферромагнитного материала:

$$N_i = \frac{H_c (1 - K_r)}{M_r}. \quad (5)$$

В [20] рекомендовано при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии определять параметры K_r и $\xi = H_c/M_s$ материала. С учетом этого:

$$N_i = \xi \frac{1 - K_r}{K_r}. \quad (6)$$

Формулы (5), (6) позволяют анализировать влияние режимов получения магнитных материалов на их внутренний коэффициент N_i размагничивания. Так, на рис. 3 приведены результаты анализа изменения N_i стали 30 от температуры T_i ее отпуска и твердости HRC.

Магнитные параметры стали 30 после разных температур T_i отпуска после закалки от 860 °C, измеренные в [21] по стандартным методикам, приведены в таблице.

Полученный результат показывает монотонность зависимостей $N_i(T_i)$ и $N_i(\text{HRC})$ во всем диапазоне изменения T_i (в отличие от немонотонности этой зависимости у параметра H_c в интервале 450 °C ≤ T_i ≤ 550 °C). Этот результат получен на основании измерений по стандартным методикам параметров H_c , M_r и M_s стали 30, приведенных в справочнике [21]. Экспериментальное построение полученных на рис. 3 зависимостей с использованием стандартной методики определения N_i невозможно, так как выполнение требования [4, п. 37]) построения безгистерезисной кривой намагничивания на термически размагниченном материале (то есть после нагрева его выше температуры Кюри) исказит влияние температуры T_i отпуска образца на его магнитные свойства.

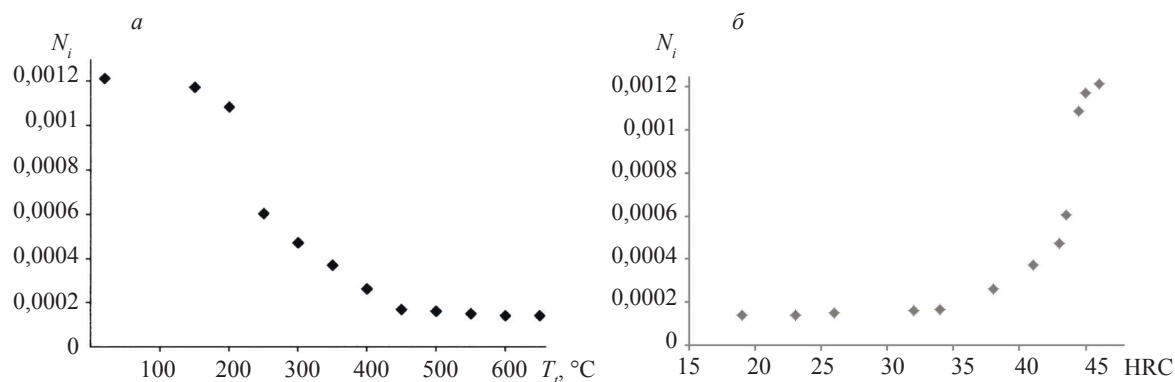


Рис. 3. Влияние температуры T_i отпуска (а) и твердости HRC (б) стали 30 после закалки от 860 °С на ее внутренний коэффициент N_i размагничивания. Расчет N_i по формуле (5).

Таблица 1

Результаты измерения в [21] твердости HRC, H_c , M_r и M_s стали 30, отпущенной при разных T_i , и результаты расчета N_i этих материалов по формуле (5)

T_i , °С	HRC	H_c , А/м	M_r , кА/м	M_s , кА/м	N_i
20	46	2300	865	1589	0,001212
150	45	2250	870	1591	0,001172
200	44,5	2100	876	1599	0,001084
250	43,5	1430	970	1644	0,000604
300	44	1220	1007	1652	0,000473
350	41	1130	1070	1650	0,000371
400	38	995	1145	1643	0,000263
450	34	873	1248	1645	0,000169
500	32	876	1265	1648	0,000161
550	26	866	1277	1639	0,000150
600	23	834	1280	1632	0,000141
650	19	730	1235	1622	0,000141

ВЫВОДЫ

На основании достоверно обоснованных физических предпосылок математически точно разработаны формулы для определения безгистерезисной кривой намагничивания и внутреннего коэффициента N_i размагничивания ферромагнитного материала, использующие результаты измерения его коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и намагниченности технического насыщения. Упрощение определения N_i и повышение его точности достигнуто благодаря тому, что для определения N_i необходимо один раз намагнитить материал до технического насыщения и измерить по стандартным методикам с минимальной по сравнению с другими магнитными параметрами погрешностью всего три основных магнитных параметра материала. Формулы предназначены для анализа влияния состава и термических обработок сталей, чугунов, пористых материалов на их N_i (то есть на изменения их структуры).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. 784 с.
2. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории практического применения. М.—Л.: Государственное энергетическое издание, 1957. 256 с.
3. Янус Р.И. Намагничивания кривые / Физический энциклопедический словарь. Т. 3. М.: Советская энциклопедия, 1963. С. 354—355.
4. ГОСТ 19693—74. Материалы магнитные. Термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1974. 32 с.

5. *Silveyra J.M., Conde Garrido J.M.* On the anhysteretic magnetization of soft magnetic materials // AIP Advances. March 2022. V. 12. Is. 3. id.035019. 13 p. <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/9.0000328>
6. *Jiles D.* Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. London: Published by Chapman & Hall, 1989. 440 p.
7. *Сташков А.Н., Сомова В.М., Сажина Б.Ю., Сташкова Л.А., Ничипурук А.Н.* Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-старееющих сталях // Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 36—42.
8. *Горкунов Э.С., Захаров В.А., Ульянов А.И., Чулкина А.А.* Влияние формы и ориентации пор на внутренний коэффициент размагничивания пористых магнитных материалов // Дефектоскопия. 2001. № 3. С. 31—37.
9. *Takács J., Kovács G., Varga L.K.* Internal Demagnetizing Factor in Ferrous Metals // Hindawi Publishing Corporation // Journal of Metallurgy. V. 2012. Article ID 752871. 5 p. DOI: 10.1155/2012/752871
10. *Сандомирский С.Г.* Оценка внутреннего коэффициента размагничивания чугунов по результатам измерения их остаточной намагниченности // Металлы. 2013. № 3. С. 88—94.
11. *Сандомирский С.Г.* Изменение связи между магнитными параметрами чугуна по сравнению со сталью под влиянием внутреннего размагничивания // Литье и металлургия. 2014. № 4. С. 105—108.
12. *Varga L.K., Kovács J., Novák L.* Determination of external and internal demagnetizing factors for strip-like amorphous ribbon samples // Journal of Magnetism and Magnetic Material. 2020. V. 507. P. 1—5.
13. *Mccann Steven M., Leach J., Reddy Subrayal M., Mercer T.* Methods of investigating the demagnetization factors within assemblies of superparamagnetic nanoparticles // AIP Advances. 2022. V. 12. P. 075212-1—075212-12. DOI: 10.1063/5.0095899
14. *Клюев В.В., Сандомирский С.Г.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Изд. дом СПЕКТР, 2017. 248 с.
15. ГОСТ 8.377—80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1986. 22 с.
16. *Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.В.* Магнитные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1969. 248 с.
17. *Сандомирский С.Г.* Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса // Электротехника. 2023. № 10. С. 55—60. DOI: 10.53891/00135860_2023_10_55
18. *Янус Р.И.* Магнитная дефектоскопия. М.—Л.: Гостехиздат, 1946. 171 с.
19. *Сандомирский С.Г.* Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам // Дефектоскопия. 1990. № 12. С. 53—59.
20. *Сандомирский С.Г.* Повышение структурной чувствительности остаточной намагниченности и коэрцитивной силы сталей // Дефектоскопия. 2023. № 8. С. 62—64.
21. *Буда Г.В., Ничипурук А.П.* Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.

REFERENCES

1. *Bozorth R.M.* Ferromagnetism. D Van Nostrand Company, Inc., New York, 1951. 867 p.
2. *Polivanov K.M.* Ferromagnetics. Fundamentals of the theory of practical applications. Moscow—Leningrad: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdanie, 1957. 256 p. (In Russian).
3. *Janus R.I* Magnetization curves / Physical Encyclopaedic Dictionary. T. 3. Moscow: «Sovetskaya enciklopediya», 1963. P. 354—355.
4. GOST 19693—74. Magnetic materials. Terms and definitions. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1974. 32 p. (In Russian).
5. *Silveyra J.M., Conde Garrido J.M.* On the anhysteretic magnetization of soft magnetic materials // AIP Advances. March 2022. V. 12. Is. 3. id.035019. 13 p. <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/9.0000328>
6. *Jiles D.* Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. Published by Chapman & Hall, London, 1989. 440 p.
7. *Stashkov A.N., Somova V.M., Sazhina B.Ju., Stashkova L.A., Nichipuruk A.N.* Magnetic method for determining the amount of residual austenite in maraging steels // Defektoskopiya. 2011. No. 12. P. 36—42. (In Russian).
8. *Gorkunov E.S., Zakharov V.A., Ul'yanov A.I., Chulkina A.A.* Influence of pore shape and orientation on the internal demagnetisation coefficient of porous magnetic materials // Defektoskopiya. 2001. No. 3. P. 31—37. (In Russian).
9. *Takács J., Kovács G., Varga L.K.* Internal Demagnetizing Factor in Ferrous Metals // Hindawi Publishing Corporation. Journal of Metallurgy. 2012. Article ID 752871. 5 pages. DOI: 10.1155/2012/752871
10. *Sandomirski S.G.* Estimation of the Internal Demagnetizing Factor of Cast Iron from Its Measured Remanent Magnetization // Metally. 2013. No. 3. P. 88—94.

11. *Sandomirski S.G.* Change in the relationship between the magnetic parameters of cast iron compared to steel under the influence of internal demagnetisation // *Lit'e i metallurgija*. 2014. No. 4. P. 105—108. (In Russian).
 12. *Varga L.K., Kováčb J., Novák L.* Determination of external and internal demagnetizing factors for strip-like amorphous ribbon samples // *Journal of Magnetism and Magnetic Material*. 2020. V. 507. P. 1—5.
 13. *Mccann Steven M., Leach J., Reddy, Subrayal M., Mercer T.* Methods of investigating the demagnetization factors within assemblies of superparamagnetic nanoparticles // *AIP Advances*. 2022. V. 12. P. 075212-1—075212-12. DOI: 10.1063/5.0095899
 14. *Kljuev V.V., Sandomirski S.G.* Analysis and synthesis of structure-sensitive magnetic parameters of steels. Moscow: Izdatel'skij dom «SPEKTR», 2017. 248 p. (In Russian).
 15. GOST 8.377—80. Magnetically soft materials. Methodology of measurements for determination of static magnetic characteristics. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1986. 22 p. (In Russian).
 16. *Chernyshev E.T., Chechurina E.N., Chernysheva N.G., Studencov N.V.* Magnetic measurements. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1969. 248 p. (In Russian).
 17. *Sandomirski S.G.* Determining the Anhysteretic Magnetization Curve for a Ferromagnetic Material According to the Limiting Loop Parameters of Its Magnetic Hysteresis // *Electrotehnika*. 2023. No. 10. P. 55—60.
 18. *Janus R.I.* Magnetic defectoscopy. Moscow—Leningrad: Gostehizdat, 1946. 171 p. (In Russian).
 19. *Sandomirski S.G.* Sensitivity of Remanent Magnetization of Ferromagnetic Components to the Magnetic Characteristics of Their Materials and Geometrical Parameters // *Defektoskopiya*. 1990. No.12. P. 53—59.
 20. *Sandomirski S.G.* Enhancement of structural sensitivity of residual magnetization and coercivity of steels // *Defektoskopiya*. 2023. No. 8. P. 62—64. (In Russian).
 21. *Bida G.V., Nichipuruk A.P.* Magnetic Properties of Heat-Treated Steels. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. 218 p. (In Russian).
-

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕСТ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ ПОЛЯ И ПОТОКА В ПРИСТАВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУРОСКОПОВ

© 2024 г. А. В. Батуева^{1,*}, О. Н. Василенко^{1,**}, В. Н. Костин^{1,***}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи
Ковалевской, 18

E-mail: *batuevaav@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru; ***kostin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 16.05.2024; после доработки 29.05.2024

Принята к публикации 31.05.2024

Для решения задач магнитного контроля актуальна оптимизация типоразмеров намагничивающих устройств. С целью получения сведений и особенностей о пространственном распределении магнитных поля и потока в зоне контроля была смоделирована замкнутая магнитная цепь «приставной преобразователь—объект контроля». Рассмотрены модели с различными конструктивными особенностями приставного преобразователя. В качестве объектов для исследования использовались образцы с отличающимися друг от друга магнитными свойствами. Результаты обработки данных показали асимметрию распределения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в зоне контроля при конструкции приставного преобразователя с одной щелью-преобразователем.

Ключевые слова: замкнутая магнитная цепь, межполюсное пространство, моделирование, напряженность магнитного поля, приставной П-образный преобразователь.

OPTIMIZATION OF FIELD AND FLUX TRANSDUCER LOCATIONS IN ATTACHABLE TRANSDUCERS OF MAGNETIC STRUCTUROSCOPES

© 2024 A. V. Batueva^{1,*}, O. N. Vasilenko^{1,**}, V. N. Kostin^{1,***}

¹Institute of Metals Physics, Ural Branch of RAS,
Russia 620108 Yekaterinburg, Sofya Kovalevskaya Str., 18

E-mail: *batuevaav@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru; ***kostin@imp.uran.ru

Optimization of magnetizing devices' standard sizes is relevant for solving magnetic control problems. In order to obtain detailed information and feature about spatial distribution of field and flux in the control zone, a closed magnetic circuit "attachment transducer — control object" was modeled. The models with different design features of the dowel transducer were considered. Samples with different magnetic properties were used as objects for investigation. The results of data processing showed the asymmetry of the distribution of the tangential component of the magnetic field strength in the control zone at the design of the transducer with one slot.

Keyword: closed magnetic circuit, interpolate space, modeling, magnetic field strength, attached U-shaped transducer.

DOI: 10.31857/S0130308224060083

ВВЕДЕНИЕ

Для решения вопросов оптимизации типоразмеров намагничивающих устройств, а также для месторасположения датчиков поля и потока, необходимы детальные сведения о пространственном распределении поля и потока внутри объектов контроля и на поверхности объектов в зоне контроля. В рамках решения конкретной магнитной задачи необходимо выбрать оптимальные размеры и конструкцию приставного преобразователя [1, 2].

Целью данной работы является исследование пространственного распределения магнитных полей и потоков в составной замкнутой магнитной цепи «преобразователь—объект контроля» при варьировании количества и месторасположения щелей-преобразователей в полюсах П-образного приставного преобразователя для проведения магнитных измерений посредством датчиков поля.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

В наше время существуют разные по сложности и направленности программы для плоскостного и пространственного моделирования распределений магнитного потока и поля. Одной из наиболее используемых программ на развивающемся рынке моделирования электромагнитных задач считается Comsol Multiphysics. Модуль AC/DC позволяет проводить автомати-

ческий инженерный анализ, получать решение и обрабатывать результаты, значительно сокращая время на исследования.

В данной работе в программном пакете COMSOL Multiphysics были построены модели приставного преобразователя и объекта контроля. В работах [3, 4] было экспериментально доказано эффективное расположение датчиков Холла вблизи объектов контроля в полюсах электромагнита, именно поэтому было принято решение исследовать влияние наличия щелей-преобразователей в полюсах П-образного приставного преобразователя на распределение магнитных полей и потоков в зоне контроля (межполюсном пространстве преобразователя в объекте контроля) [5].

В качестве объекта контроля использовались образцы остаточной магнитной индукции (ОМИ). Образцы ОМИ были выбраны таким образом, чтобы оценить взаимосвязь типоразмеров преобразователя и магнитных характеристик образцов. Коэрцитивная сила материалов ОМИ варьировалась в диапазоне от 5,76 до 81,1 А/см. Остаточная магнитная индукция варьировалась в диапазоне 0,216 до 1,52 Т. Данные о магнитных характеристиках образцов ОМИ представлены в табл. 1. В качестве материала сердечника приставного преобразователя использовалось АРМКО-железо.

Сечение полюса приставного преобразователя составляло 12×28 мм. Межполюсное расстояние преобразователя равнялось 32 мм, центр находился в точке 16 мм, отсчитывая от грани полюса со щелью-преобразователем (полюс 1). Магнитодвижущая сила в одной катушке составила 1950 ампер-витков.

Таблица 1

Магнитных характеристики образцов ОМИ

Материал	B_r , Т	H_{cb} , А/см	H_{cp} , А/см	μ_{max}	H_{max} , А/см	B_{max} , Т
ОМИ 1	0,216	81,1	83	17	574	0,491
ОМИ 4	0,826	27	27	171	554	1,46
ОМИ 5	0,927	31,5	31,5	156	546	1,67
ОМИ 7	1,29	7,59	7,6	719	542	2,11
ОМИ 9	1,52	5,76	5,76	983	542	2,1

3D-модели приставного преобразователя и образца ОМИ представлена на рис. 1.

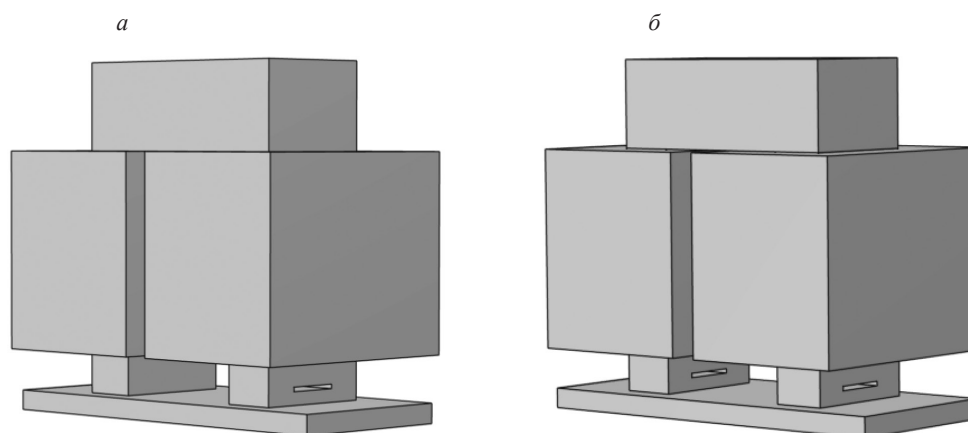


Рис. 1. 3D-модель приставного преобразователя с 1 щелью (а) и с 2 щелями (б).

В ходе работы проводилось исследование распределения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в межполюсном пространстве преобразователя на поверхности объекта контроля от полюса 1 до полюса 2 в трех случаях. При отсутствии щелей в приставном преобразователе, при наличии одной щели в полюсе 1, а также при наличии двух щелей в обоих полюсах приставного преобразователя. Контур исследования представлен на рис. 2.

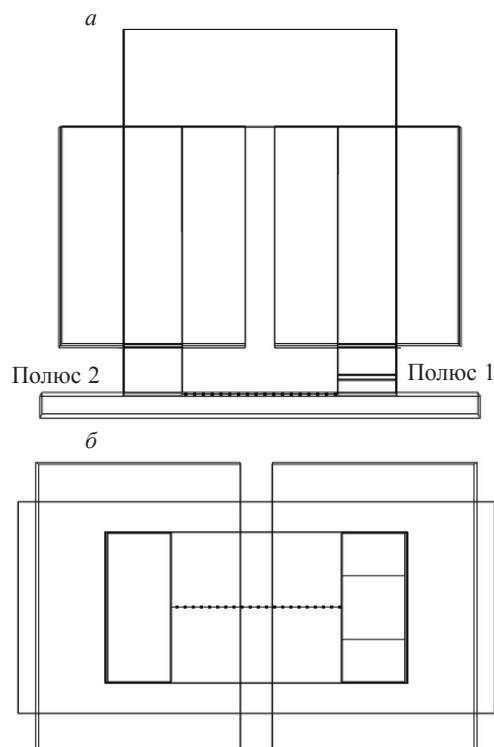


Рис. 2. Контур исследований в межполюсном пространстве приставного преобразователя: фронтальный вид (а) и вид сверху (б).

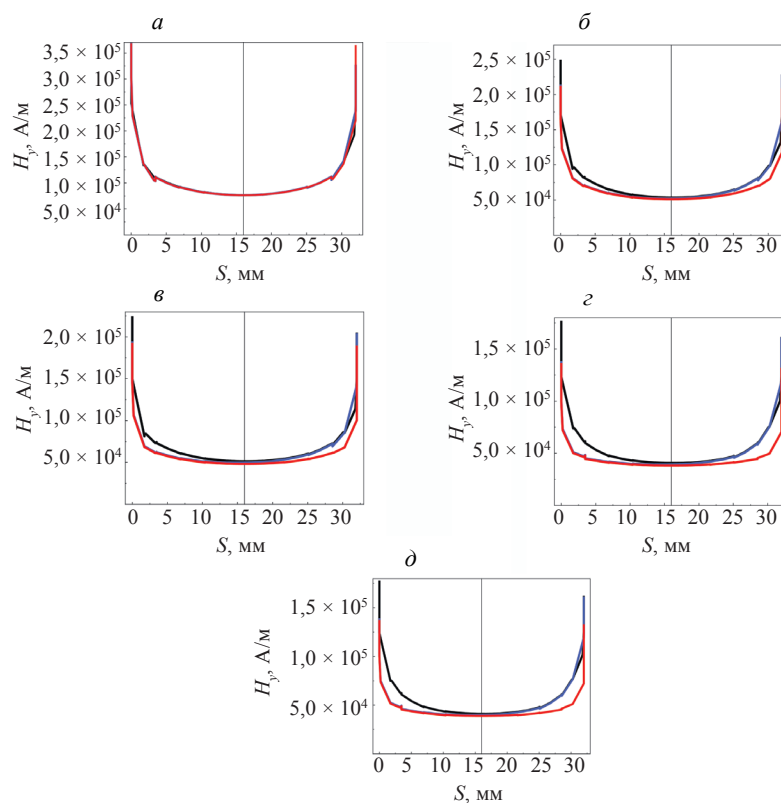


Рис. 3. Зависимости тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в межполюсном пространстве на поверхности объекта контроля образцов: ОМИ 1 (а), ОМИ 4 (б), ОМИ 5 (в), ОМИ 7 (г) и ОМИ 9 (д).

На рис. 3 представлены зависимости компоненты напряженности магнитного поля от контура исследования в межполюсном пространстве на поверхности объекта контроля при различных материалах ОМИ 1 (а), ОМИ 4 (б), ОМИ 5 (в), ОМИ 7 (г) и ОМИ 9 (д).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования показали, что для моделей с приставным преобразователем без щелей-преобразователей и при наличии двух щелей положение координаты минимума тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля не меняется при изменении магнитных свойств объекта контроля и находится в точках практически по центру зоны контроля.

Обработка результатов данных для моделей с приставным преобразователем при наличии одной щели-преобразователя в полюсе 1 продемонстрировала асимметрию распределения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля, т. е. наблюдалось смещение положения координаты минимума в сторону полюса, имеющего щель, что показано в табл. 2. Также на величину смещения координаты минимума влияли магнитные свойства материалов образцов ОМИ.

Таблица 2

Положение координат минимума H_t

Материал	Без щелей	С 1 щелью	С 2 щелями
ОМИ 1	15,95 мм	15,95 мм	15,95 мм
ОМИ 4, ОМИ 5	16,22 мм	15,3 мм	15,95 мм
ОМИ 7, ОМИ 9	16,22 мм	13,59 мм	15,95 мм

Стоит отметить, что для материала со значением коэрцитивной силы 81,1 А/см положение координаты минимума тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля находилось в точке 15,95 мм и не изменялось при наличии щелей, т.к. не достигалось техническое насыщение образца (образец ОМИ 1).

ВЫВОДЫ

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при конструировании приставных преобразователей магнитных структуроскопов, а также при выборе месторасположения датчиков поля обязательно должна быть учтена асимметрия распределения магнитного поля в зоне контроля. Отмечено, что при данных конструктивных особенностях приставного П-образного преобразователя при исследовании высококоэрцитивных образцов не достигается состояние магнитного насыщения материала образца, что является необходимым при измерении магнитных характеристик вещества объектов контроля.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Диагностика» №122021000030-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин В.Н., Лукиных О.Н., Смородинский Я.Г., Костин К.В. Моделирование пространственного распределения поля и индукции в локально намагничиваемых массивных объектах и оптимизация конструкции П-образных преобразователей // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 13—21.
2. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.
3. Костин В.Н., Царькова Т.П., Сажина Е.Ю. Измерение относительных значений магнитных свойств вещества контролируемых изделий в составных замкнутых цепях // Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 15—26.
4. Горкунов Э.С., Табачник В.П. Изучение эффективности расположения датчика Холла в приставном магнитном устройстве, используемом для регистрации коэрцитивной силы локального участка изделия // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 3—8.
5. Костин В.Н., Василенко О.Н., Михайлов А.В., Лукиных Н.П., Ксенофонов Д.Г. О преимуществах локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов по внутреннему полю // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 21—27.

REFERENCES

1. *Kostin V.N., Lukinykh O.N., Smorodinskii Y.G., Kostin K.V.* Simulation of field and inductance spatial distribution in locally magnetized massive objects and optimization of u-shaped transducer design // Defektoskopiya. 2010. No. 6. P. 13—21.
2. *Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V.* DIUS-1.15M mobile hardware–software structuroscopy system // Defektoskopiya. 2018. No. 9. P. 47—53.
3. *Kostin V.N., Tsar'kova T.P., Sazhina E.Yu.* Measuring of relative quantity of magnetic properties of tested articles in complex closed magnetic circuits // Defektoskopiya. 2001. No. 1. P. 15—26.
4. *Gorkunov E.S., Tabachnik V.P.* Study of arrangement efficiency of hall sensors of an attachable magnetic instrument used for recording the coercive force of a local area of an article // Defektoskopiya. 2008. No. 6. P. 3—8.
5. *Kostin V.N., Vasilenko O.N., Mikhailov A.V., Lukinykh N.P., Ksenofontov D.G.* On the advantages of local measurement of coercive force of ferromagnetic objects based on internal field // Defektoskopiya. 2020. No. 7. P. 21—27.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИБОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КАТУШКОЙ

© 2024 г. О.А. Колганов^{1,*}, К.И. Доронин^{2,**}, А.С. Голев^{3,***}

¹Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

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

³ООО «КОНСТАНТА», Россия 198097 Санкт-Петербург, Огородный переулок, 21, литер А, оф. 404
E-mail: *kolganoff2014@yandex.ru; **doronin.k.i@mail.ru; ***artemgolev1999@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2024; после доработки 31.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

Рассмотрены вопросы повышения точности оценки параметров движения индентора в первичном преобразователе прибора динамического инструментального индентирования с использованием двух встречно включенных обмоток катушки (дифференциальной катушки). Расчет характеристик первичного преобразователя выполнен на основе компьютерного моделирования и решения задачи пошаговой условной оптимизации относительных размеров магнита ударника и катушки. Представлены результаты исследования первичного преобразователя с дифференциальной катушкой (сравнительных оценок регистрируемого сигнала — ЭДС и динамического модуля упругости стали Ст.3) по отношению к существующему первичному преобразователю датчика прибора «ТПЦ-7», которые показали его преимущество.

Ключевые слова: динамическое инструментальное индентирование, компьютерное моделирование, контактное ударное взаимодействие, параметры движения, постоянный магнит.

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE PRIMARY TRANSDUCER OF THE DYNAMIC INSTRUMENTED INDENTATION DEVICE WITH A DIFFERENTIAL COIL

© 2024 O. A. Kolganov^{1,*}, K. I. Doronin^{2,**}, A. S. Golev^{3,***}

¹ITMO University, Russia 197101 St. Petersburg, Kronverksky Ave., 49

²St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Russia 199106 St. Petersburg, 21st Line of Vasilievsky Island, 2

³LLC CONSTANT, Russia 198097 St. Petersburg, Ogorodny lane, 21, letter A, of. 404
E-mail: *kolganoff2014@yandex.ru; **doronin.k.i@mail.ru; ***artemgolev1999@gmail.com

The issues of improving the accuracy of estimating the indenter motion parameters in the primary converter of a dynamic instrumented indentation device using two counter-connected coil windings (differential coil) are considered. The calculation of the characteristics of the primary converter is based on computer modeling and solving the problem of step-by-step conditional optimization of the relative dimensions of the striker magnet and coil. The results of a study of a primary converter with a differential coil (comparative estimates of the recorded signal — EMF and the dynamic modulus of elasticity of steel St.3) in relation to the existing primary sensor converter of the TPTS-7 device, which showed its advantage.

Keywords: dynamic instrumented indentation, computer modeling, contact-impact interaction, motion parameters, permanent magnet.

DOI: 10.31857/S0130308224060092

ВВЕДЕНИЕ

Оценка механических характеристик материалов является актуальной задачей в различных отраслях промышленности. Одним из перспективных методов безобразцового контроля механических свойств материалов и изделий является метод динамического инструментального индентирования (ДИИ), сущность которого заключается в непрерывной регистрации параметров движения индентора в процессе его контактного ударного взаимодействия (КУВ) с испытываемым материалом. В настоящее время для регистрации параметров движения ударника при КУВ применяется магнитоиндукционный метод [1—3]. Для повышения точности оценки параметров движения индентора предлагается совершенствование первичного преобразователя (ПП) на основе использования дифференциальной катушки (рис. 1), которая ввиду симметричности конструкции минимизирует зависимость ЭДС от перемещения магнита, при условии, что диапазон перемещения многократно меньше суммарной высоты обмоток и лежит в области их раздела.

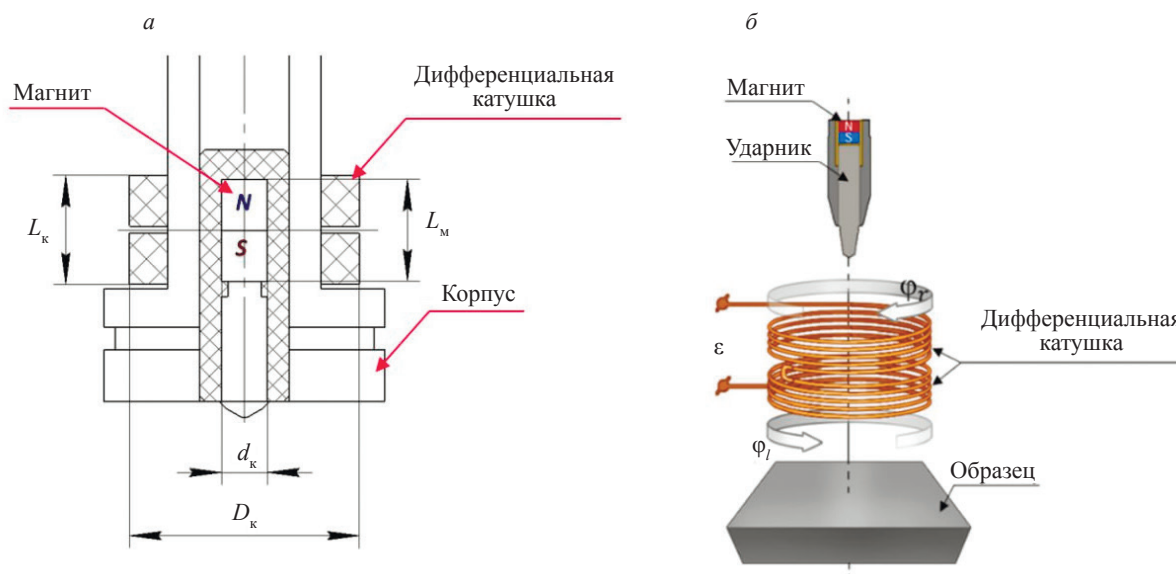


Рис. 1. Иллюстрация ПП с дифференциальной катушкой: эскиз конструкции ПП (а); схема ПП (б).

Целью исследования является определение значений параметров ПП, соответствующих требованиям кинетической энергии и скорости удара, массе ударника (бойка), радиусу индентора (шарикового наконечника) по ГОСТ Р 8.969—2019 (ИСО 16859-1:2015) [4] и обеспечивающих качество сигнала ЭДС, а также точность оценки динамического модуля упругости материала.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭДС $e(t)$, наводимая на выходах дифференциальной катушки при движении магнита через нее, зависит от ряда параметров, влияющих на качество регистрируемого сигнала:

$$e(t) = f(d_k, L_k, L_m, d_m, \mu_0, N, n, c, L, R, S, t),$$

где μ_0 — магнитная проницаемость проводника; N — количество витков каждой из обмоток дифференциальной катушки; R — сопротивление проводника; n — число слоев намотки; c — толщина намотки; S — площадь поперечного сечения проводника; d_k — диаметр дифференциальной катушки; L_k — длина дифференциальной катушки; L_m — длина постоянного магнита; d_m — диаметр постоянного магнита.

Исследование закономерностей влияния параметров ПП на регистрируемый $e(t)$ выполнялось с использованием компьютерной модели, разработанной на основе интегрированной платформы для моделирования Comsol Multiphysics с интерфейсом Magnetic Fields модуля AC/DC, отражающей наводимую в дифференциальной катушке $e(t)$ при пролете постоянного магнита с ускорением свободного падения при нормируемой скорости удара [5]. В качестве варьируемого входного параметра принимались значения диаметра магнита (d_m). Оценка оптимальных значений параметров ПП осуществлялась на основе решения задач пошаговой условной оптимизации в следующем виде:

$$e(t) = f\left(\frac{d_m}{L_m}\right) \rightarrow \max, \quad e(t) = f\left(\frac{L_m}{L_k}\right) \rightarrow \max, \quad e(t) = f\left(\frac{L_k}{d_k}\right) \rightarrow \max.$$

В табл. 1 представлены основные параметры и характеристики ПП, соответствующие основным требованиям по параметрам удара, предъявляемым к датчикам типа D по ГОСТ Р 8.969—2019 (ИСО 16859-1:2015) [4].

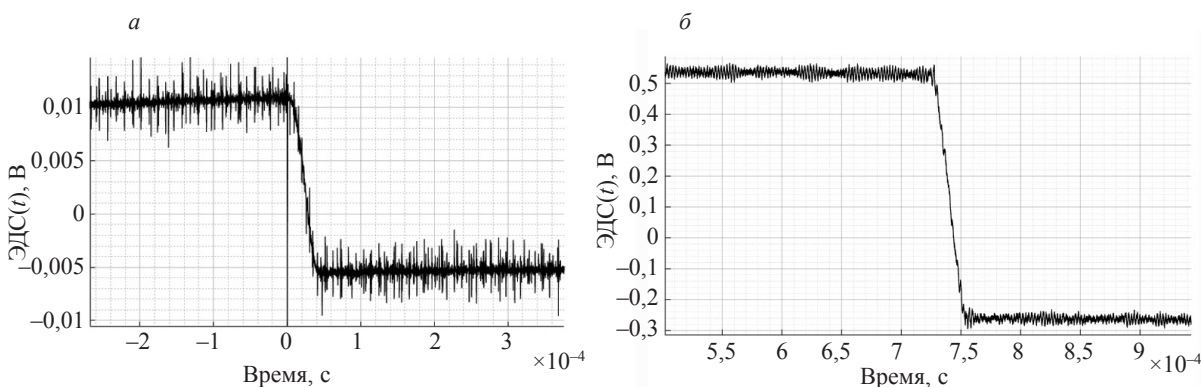
Параметры и характеристики прототипа ПП с ДКИ

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
Диаметр магнита	d_m	4,0 мм
Длина магнита	L_m	8,5 мм
Внутренний диаметр дифференциальной катушки	d_k	14,0 мм
Сопротивление дифференциальной катушки	R	62,4 Ом
Длина проводника	L	30 м
Количество витков обмоток дифференциальной катушки	N	694
Число слоев	N_l	8

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результативность разработки прототипа ПП с ДКИ определялась на основе сравнительных оценок регистрируемой $e(t)$ при КУВ с образцом из углеродистой стали, а также оценок динамического модуля упругости материала по отношению к ПП датчика прибора «ТПЦ-7», разработанного Институтом прикладной физики Национальной академии наук Беларуси и имеющего одну обмотку катушки [6, 7].

При сравнительной оценке качества сигнала ЭДС при КУВ использовался плоский образец из стали Ст. 3. Сигнал ЭДС регистрировался с помощью цифрового осциллографа марки Rohde Schwarz, а дальнейшая обработка полученных данных осуществлялась на компьютере с помощью программного обеспечения, реализованного в программной среде MATLAB. На рис. 2 представлены графики $e(t)$, полученные с ПП прибора «ТПЦ-7» и с прототипа ПП с ДКИ.

Рис. 2. Графики $e(t)$: ПП прибора «ТПЦ-7» (а); прототип ПП с ДКИ (б).

Оценка качества регистрируемой $e(t)$ производилась на основе оценки показателя SNR (отношение амплитуд сигнал/шум):

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{сигнал}}}{A_{\text{шум}}} \right),$$

где $A_{\text{сигнал}}$ — амплитуда $e(t)$; $A_{\text{шум}}$ — амплитуда шумовой составляющей.

Результаты оценки показателя SNR для ПП прибора «ТПЦ-7» и прототипа ПП с ДКИ представлена в табл. 2.

Сравнительный анализ результатов, представленных в табл. 4, свидетельствует о том, что прототип ПП с ДКИ менее восприимчив к внешним помехам, имеет меньший уровень собственных шумов, за счет этого способен обеспечивать возможность обработки $e(t)$ с меньшими энергетическими характеристиками по сравнению с ПП прибора «ТПЦ-7».

Таблица 2

Значения показателя SNR (отношение сигнал/шум)

Тип ПП	$A_{\text{сигнал}}, \text{В}$	$A_{\text{шум}}, \text{В}$	SNR, дБ
ПП прибора «ТПЦ-7»	0,0166	0,0466	9,5
Прототип ПП с ДКИ	0,7750	0,0811	19,6

Таблица 3

Экспериментальные оценки динамического модуля упругости E_d , ГПа

№ изм.	1	2	3	4	5	6	7	8
ПП прибора «ТПЦ-7»	177	193	177	154	171	194	171	196
Прототип ПП с ДКИ	181	175	180	175	187	179	175	187

Таблица 4

Результаты оценки погрешностей измерения модуля упругости

Тип ПП	Систематическая погрешность, ГПа	Случайная погрешность, ГПа	Основная (суммарная) погрешность, ГПа
ПП прибора «ТПЦ-7»	11,5	24,7	36,2
Прототип ПП с ДКИ	3,9	9,3	13,2

Экспериментальная оценка динамического модуля нормальной упругости материала по данным диаграмм вдавливания индентора производилась согласно ГОСТ Р 56474—2015 [1] на плоском образце типа I (по ГОСТ 1497—84 (ИСО 6892-8) из стали Ст. 3 по результатам серии из 12-и измерений с использованием прототипа ПП с ДКИ и ПП прибора «ТПЦ-7» и представлена в табл. 3.

Экспериментальная оценка модуля упругости материала образца также производилась на основе обработки результатов его испытаний на разрыв по ГОСТ 1497—84 (ИСО 6892-84) [8] с использованием испытательной машины «walter+bai ag 150 кН» и составила 179 ГПа, которая далее принималась в качестве его опорного значения.

Оценка погрешностей измерения модуля упругости проводилась согласно методике, изложенной в ГОСТ Р 56474—2015 [1], результаты которой представлены в табл. 4.

Сравнительный анализ погрешностей свидетельствует о преимуществе разработанного прототипа ПП с ДКИ по сравнению с ПП прибора «ТПЦ-7».

ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм расчета параметров ПП с ДКИ, проведенный на основе результатов компьютерного моделирования и решения задачи пошаговой условной оптимизации его относительных геометрических размеров, позволил выполнить разработку его прототипа и определить граничные условия его применения.

Сравнительная оценка $e(t)$, регистрируемой прототипом ПП с ДКИ по отношению к существующему ПП датчика прибора «ТПЦ-7», показала увеличение значения показателя SNR (отношение сигнал/шум) примерно в 2 раза, что свидетельствует о его лучшей помехозащищенности.

Полученные результаты сравнительной оценки динамического модуля упругости стали Ст.3 позволяют сделать вывод о том, что суммарная погрешность измерений при использовании ПП с ДКИ будет меньше, чем при использовании ПП прибора «ТПЦ-7».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56474—2015. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. М.: Стандартинформ, 2015. С. 15—17.

2. Рудницкий В.А., Рабцевич А.В. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов // Дефектоскопия. 1997. № 4. С. 79—86.

3. Егоров Р.А., Ильинский А.В., Кузьмичев М.В., Федоров А.В. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования // Дефектоскопия. 2020. № 6. С. 61—69.
4. ГОСТ 8.969—2019 (ИСО 16859-1:2015) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений.
5. Khoshev A., Kolganov O., Egorov R.A., Fedorov A.V., Kinzhagulov I.U. Computer Simulation of Registration of Indenter Motion in the Process of Contact-Impact Interaction / 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2023. P. 1—4.
6. Колганов О.А., Егоров Р.А., Ильинский А.В., Хошев А.Е., Федоров А.В. Дифференциальное включение катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 1. С. 74—80.
7. Твердомеры портативные цифровые ТПЦ // GRmetr.ru URL: <https://grmetr.ru/gosreestr/1409012-89241-23-tpts> (дата обращения: 26.05.2024).
8. ГОСТ 1497—84 (ИСО 6892-84) Методы испытаний на растяжение: дата введения 01.01.1986. М.: Стандартинформ, 2008. 26 с.

REFERENCES

1. GOST R 56474—2015. Non-destructive control of physical and mechanical properties of materials and coatings of space technology by dynamic indentation. М.: Standartinform, 2015. P. 15—17.
2. Rudnitsky V.A., Rabtsevich A.V. The method of dynamic indentation for evaluating the mechanical characteristics of metallic materials // Defektoskopiya. 1997. No. 4. P. 79—86.
3. Egorov R.A., Ilyinsky A.V., Kuzmichev M.V., Fedorov A.V. Hardware and algorithmic support of the dynamic indentation process // Defektoskopiya. 2020. No. 6. P. 61—69.
4. GOST 8.969—2019 (ISO 16859-1:2015) State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). Metals and alloys. Determination of hardness according to Lieb scales. Part 1. Measurement method.
5. Khoshev A., Kolganov O., Egorov R.A., Fedorov A.V., Kinzhagulov I.U. Computer Simulation of Registration of Indenter Motion in the Process of Contact-Impact Interaction / 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2023. P. 1—4.
6. Kolganov O.A., Egorov R.A., Ilyinsky A.V., Khoshev A.E., Fedorov A.V. Differential inclusion of inductors for recording the parameters of the striker's motion during dynamic indentation // Izvestiya vysshchih uchebnykh zavedeniy. Instrumentation. 2023. V. 66. No. 1. P. 74—80.
7. Portable digital TPC hardness testers // GRmetr.ru URL: <https://grmetr.ru/gosreestr/1409012-89241-23-tpts> (date of reference: 05/26/2024).
8. GOST 1497—84 (ISO 6892-84) Tensile testing methods: date of introduction 01.01.1986. М.: Standartinform, 2008. 26 p.



Уважаемые коллеги!

ПРИГЛАШАЕМ ВАС ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ
И ВЫСТУПИТЬ С ДОКЛАДОМ на

XXV Петербургской научно-технической конференции УЗДМ-2025
«Методология ультразвукового контроля: фундамент
и современные надстройки»,

посвященной 100-летию Анатолия Константиновича Гурвича
(20—23 мая 2025 г., Санкт-Петербург)

ОРГАНИЗАТОРЫ УЗДМ-2025

- Научный центр мостов и дефектоскопии
- Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- Секции «Физические неразрушающие методы контроля» научного совета по физике конденсированных сред РАН
- Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике
- Национального Агентства Контроля Сварки

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ ВЗНОС (без учета НДС)

для участников – 34 000 руб.
для аспирантов – 16 000 руб.
для сопровождающих (без участия в работе конференции) – 9000 руб.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ

Санкт-Петербург, Отель «Новый Петергоф»
(Петергоф, Санкт-Петербургский проспект, 34)

РАЗМЕЩЕНИЕ

Бронирование номеров — самостоятельно.
Код для гарантированного приоритетного бронирования — «УЗДМ-2025»

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ ОРГКОМИТЕТА

E-mail: uzdm2025@yandex.ru
Телефон: +7 921 9384313

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

1. Методические особенности и аспекты применения ультразвуковых антенных решеток
2. Технологические возможности ультразвуковых аппаратно-программных комплексов с визуализацией результатов в задачах стратегии цифровизации
3. Фундаментальные принципы методологии в практике ультразвукового контроля при производстве и эксплуатации продукции металлургии и машиностроения, в атомной и тепловой энергетике, трубопроводном и железнодорожном транспорте
4. Метрологическое обеспечение технологий ультразвукового контроля и диагностики. (Круглый стол)
5. Обучение, подтверждение квалификации, аттестация, сертификация ... А результат? (Круглый стол)

ФОРМЫ РАБОТЫ:

- пленарные и секционные доклады
- стендовые доклады
- круглые столы
- демонстрация оборудования

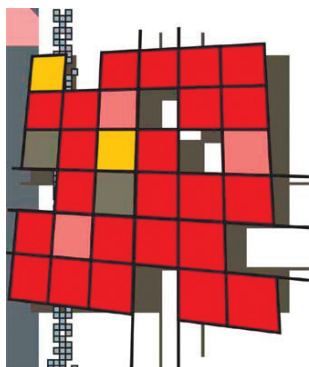
ВАЖНЫЕ ДАТЫ

- прием заявок до **15.02.2025 г.**
- прием тезисов докладов до **15.03.2025 г.**
- рассылка пригласительных билетов и программ до **10.05.2025 г.**

КУЛЬТУРНАЯ ПРОГРАММА

Экскурсии по дворцам и паркам Петергофа

Оргкомитет УЗДМ-2025



9-я международная научно-техническая конференция

«СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ»

Республика Беларусь,
г. Могилев

26—27 сентября 2024 г.

Организаторы:

Научный совет Международной ассоциации академий наук по неразрушающему контролю и технической диагностике

Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике

Институт прикладной физики НАН Беларуси

Белорусско-Российский университет

Основная тематика:

1. Дефектоскопия материалов и промышленных изделий.
2. Контроль структуры и физико-механических характеристик материалов и изделий.
3. Контроль геометрических параметров объектов.
4. Мониторинг, диагностика и прогнозирование остаточного ресурса технических объектов.
5. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле.

Круглые столы:

Передовые технологии неразрушающего контроля и диагностики: нормативная база, приборное обеспечение, проблемы и перспективы.

Подготовка кадров и сертификация персонала в области НК и ТД.

Вся информация о конференции размещена в разделе «Наука» на сайте: www.bru.by

Адрес оргкомитета, контактные телефоны, электронная почта:

Белорусско-Российский университет, пр-т Мира, д. 43, оргкомитет конференции, 12000, г. Могилев, Республика Беларусь

Сергеев Сергей Сергеевич. Tel.: (+375) 297 433868

E-mail: sss.bru@tut.by

Брискина Ирина Владимировна. Tel.: (+375) 222 713347. Fax: (+375) 222 713591

E-mail: onti336-341@yandex.ru

