



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 12

2023



СОДЕРЖАНИЕ**Акустические методы**

- А.В. Платунов, В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, П.А. Никитина.** Зеркально-теневой метод ультразвукового контроля осей железнодорожных колесных пар с использованием электромагнитно-акустического способа излучения—приема волн 3

Тепловые методы

- Г.Т. Весала, В.С. Гхали, Ю. Нага Прашанги, Б. Суреш.** Параметрическое исследование моделей обнаружения аномалий для выявления дефектов в инфракрасной термографии..... 12

- А.О. Чулков, Б.И. Шагдыров, В.П. Вавилов, Д.Ю. Кладов, В.И. Стасевский.** Обнаружение и оценка количества воды в горизонтально ориентированных авиационных сотовых панелях с помощью автоматизированного теплового контроля 26

Оптические методы

- С.В. Муравьев, Д.К. Нгуен.** Автоматическая сегментация методом комплексирования интервалов агрегированием предпочтений при распознавании дефектов сварки 34

- Е.Н. Вазирова, Р.М. Абашев, И.И. Мильман, А.И. Сюрдо.** Оптический контроль деградации пленок политетрафторэтилена и его модификации при электронном облучении..... 45

Электромагнитные методы

- А.В. Никитин, А.В. Михайлов, Л.В. Михайлов, Ю.Л. Гобов, В.Н.Костин, Я.Г.Смородинский.** Область применимости методики построения линий магнитной индукции для дефектометрии протяженных объектов 51

Общие вопросы дефектоскопии

- Ю.Я. Реутов, В.И. Пудов.** Опыт разработки и применения металлоискателей в медицинских целях..... 60

Комплексное применение методов неразрушающего контроля

- Н.В. Крысько, С.В. Скрынников, Н.А. Щипаков, Д.М. Козлов, А.Г. Кусый.** Классификация и определение размеров поверхностных дефектов трубопроводов на основе результатов комплексной диагностики ультразвуковым, вихретоковым, визуальным и измерительным методами неразрушающего контроля 69

- Информация 79

ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОЙ МЕТОД УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ОСЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСНЫХ ПАР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО СПОСОБА ИЗЛУЧЕНИЯ—ПРИЕМА ВОЛН

© 2023 г. А.В. Платунов¹, В.В. Муравьев^{1,2,*}, О.В. Муравьева^{1,2}, П.А. Никитина¹

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

²ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: *pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 04.10.2023; после доработки 12.10.2023

Принята к публикации 13.10.2023

При ультразвуковом контроле осей колесных пар железнодорожного подвижного состава зеркально-теневым методом на амплитуду принятых сигналов оказывает значительное влияние качество контакта пьезопреобразователя с цилиндрической поверхностью объекта в отличие от контроля объектов с плоскими поверхностями. Основные причины, влияющие на результаты: состояние поверхности ввода, ее кривизна, а также сила прижатия пьезопреобразователя. При использовании электромагнитно-акустических преобразователей требования к качеству поверхности значительно ниже, что позволяет снизить вероятность ошибки, связанной с качеством контакта на цилиндрической поверхности при приемочном ультразвуковом контроле зеркально-теневым методом осей колесных пар железнодорожного подвижного состава после изготовления и ремонта.

Ключевые слова: электромагнитно-акустический преобразователь, зеркально-теневого метод, оси железнодорожных колесных пар.

MIRROR-SHADOW METHOD OF ULTRASONIC TESTING OF THE RAILROAD WHEELSET AXLES USING THE ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC METHOD OF WAVE GENERATION AND RECEPTION

A.V. Platonov¹, V.V. Murav'ev^{1,2,*}, O.V. Murav'eva^{1,2}, P.A. Nikitina¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, 426069 Russia

²Udmurt Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Izhevsk, 426067 Russia
E-mail: *pmkk@istu.ru

The amplitude of the received signals during the ultrasonic testing of the railroad wheelset axles using the mirror-shadow method is significantly influenced by the quality of contact of the piezoelectric transducer with the cylindrical surface of the test object compared with the testing of objects with flat surfaces. The key reasons influencing the results of testing are the condition of the entry surface, its curvature, as well as the application force of the piezoelectric transducer. When using electromagnetic-acoustic transducers, the requirements for surface quality are significantly lower, which reduces the probability of errors associated with the quality of contact on a cylindrical surface during acceptance ultrasonic testing by the mirror-shadow method of the railroad wheelset axles after manufacture and repair.

Keywords: electromagnetic acoustic transducer, acoustic mirror-shadow method, railroad wheelset axles.

DOI: 10.31857/S0130308223120011, EDN: XIVYLI

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковой контроль объектов со стороны цилиндрической поверхности зеркально-теневым методом значительно отличается от контроля объектов с плоскими поверхностями. Качество ультразвукового контакта пьезопреобразователя (ПЭП) с поверхностью объекта оказывает влияние на амплитуду принятых сигналов и может негативно влиять на результаты контроля контактным способом [1—3]. Среди основных причин, влияющих на результаты контроля, следует отметить качество обработки и подготовки поверхности ввода, ее кривизна, а также сила прижатия пьезопреобразователя [4—6].

Многие публикации [6—9] и патенты РФ (№ 2032172, Устройство для ультразвукового контроля цилиндрических изделий, Сухоплечев П.Н. и № 2194979, Устройство для ультразвукового контроля цилиндрических изделий, Щербинский В.Г.) посвящены совершенствованию ультразвукового контроля объектов цилиндрической формы, в которых добились улучшения путем проточки рабочей поверхности призмы, использования направляющих, упругого подпружинивания, механизмов перемещения ПЭП и т.п. Авторы [10] использовали зеркально-теневой метод многократных отражений для обоснования возможности контроля пера подошвы рельса. В работе [11] представлены методики оценки поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами.

В трудах Павроса С.К. [12] определены оптимальные параметры эхометода, в работах, выполненных в ЦНИИТМАШ [13, 14], рассмотрены особенности формирования акустического поля и построены модели при вводе акустической волны с цилиндрической поверхности объекта. В работе [15] приводится расчет поправочных коэффициентов чувствительности дефектоскопа при переходе с плоскопараллельного настроечного образца на цилиндрический объект контроля, в котором учитывается площадь пятна контакта, расфокусировка, прозрачность границ и другие факторы.

Качество акустического контакта можно характеризовать по амплитуде дополнительного сигнала и в дальнейшем учитывать при определении браковочного уровня. В качестве такого импульса при контроле рэлеевскими волнами поверхности катания колеса был выбран сигнал, дважды прошедший по поверхности изделия (Патент № 2032171 РФ, Способ ультразвукового контроля цилиндрических изделий, Дымкин Г.Я. и др.), а при контроле поперечными волнами — отраженный от рабочей поверхности призмы трансформированный импульс (Патент № 2506585 РФ, Способ контроля качества акустического контакта при ультразвуковой дефектоскопии, Дымкин Г.Я. и др.).

При использовании электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей требования к качеству поверхности значительно ниже, однако контроль эхометодом такими преобразователями затруднен в виду меньшей чувствительности [16]. Благодаря введению новых информативных параметров ЭМА-способом контроля (Патент № 2783297 РФ, Способ ультразвукового контроля электропроводящих цилиндрических объектов, Муравьева О.В. и др.) цилиндрических объектов с использованием многократных отражений удалось значительно повысить чувствительность метода к дефектам [17—19] и применить в области структуроскопии легированных сталей [20] и мартенситно-старяющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди [21].

На производстве качество контакта пьезопреобразователей при ручном контроле зачастую не нормируется, поэтому человеческий фактор оказывают значительное влияние на результат контроля. Например, сравнивая амплитуды донных сигналов при контроле оси по варианту TR2 (ТИ НК В.21-1.2019 Технологическая инструкция по неразрушающему контролю деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Ультразвуковой метод), оператор неосознанно начинает сильнее прижимать преобразователь к поверхности только в той точке, в которой сигнал оказался ниже, что в итоге искажает результаты контроля.

Цель настоящей работы показать, что использование ЭМА-преобразователей поперечных волн позволяет снизить вероятность ошибки, связанной с качеством контакта пьезопреобразователей на цилиндрической поверхности при приемочном ультразвуковом контроле осей колесных пар железнодорожного подвижного состава после изготовления и ремонта зеркально-теневым методом.

ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПОДХОДЫ

Вариант метода T2 (TR2 — при ремонте) контроля зеркально-теневым методом осей колесных пар применяют для поиска дефектности металла оси (рис. 1) (ГОСТ 34656—2020).

Деталь бракуется, если амплитуды донных сигналов в трех случайно распложенных сечениях участка будут отличаться друг от друга более чем на 6 дБ при приемке новых осей (более 8 дБ — при ремонте) (ТИ НК В.21-1.2019 Технологическая инструкция по неразрушающему контролю деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Ультразвуковой метод).

Для оценки влияния качества поверхности на параметры донных сигналов проведены исследования с контактными (ПЭП) и бесконтактными (ЭМА) преобразователями. Эксперимент выполнялся на бывших в эксплуатации осях РУ1 и РУ1Ш колесных пар грузовых вагонов, а также на новых осях автотомтрис. Доступные для установки преобразователей участки цилиндрической поверхности осей были размечены на сектора шириной 20 мм, в пределах которых измерялись шероховатость и амплитуды сигналов, отраженных от противоположной поверхности.

Уточняющие исследования проведены на отраслевом стандартном образце ОСО 32.006-2002 с цилиндрической поверхностью ввода, качество которой последовательно менялось шлифовкой наждачной бумагой (от грубой до мелкой зернистости).

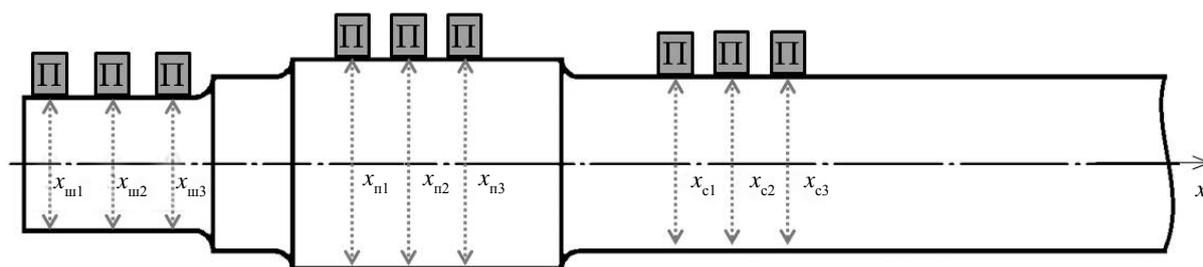


Рис. 1. Контроль оси колесной пары зеркально-теневым методом, преобразователь П устанавливается в случайно выбранных сечениях: $x_{шi}$ — на шейке; $x_{пi}$ — на подступичной части; $x_{сi}$ — на средней части оси.

В качестве оборудования выбраны ультразвуковые одноканальные дефектоскопы УД2-102ВД с пьезопреобразователем П111-5-6, УД4-Т с ЭМА-преобразователем П411-3-К18 и ЭМА-структуроскоп СЭМА [22] с преобразователем П411-2,5 (рис. 2). Пьезопреобразователь П111-5-6 излучает и принимает продольные волны, ЭМА-преобразователи — поперечные нормально поверхности ввода. Абсолютная погрешность измерения амплитуд сигналов для дефектоскопа УД2-102ВД составляет ± 1 дБ; дефектоскопом УД4-Т составляет $\pm 0,5$ дБ. Для пьезопреобразователя П111-5-6 использовалась контактная жидкость — масло индустриальное И-50А. Измерения шероховатости поверхности проведены профилографом RS100, опорный сигнал получен на образце СО-2 (см. рис. 2).

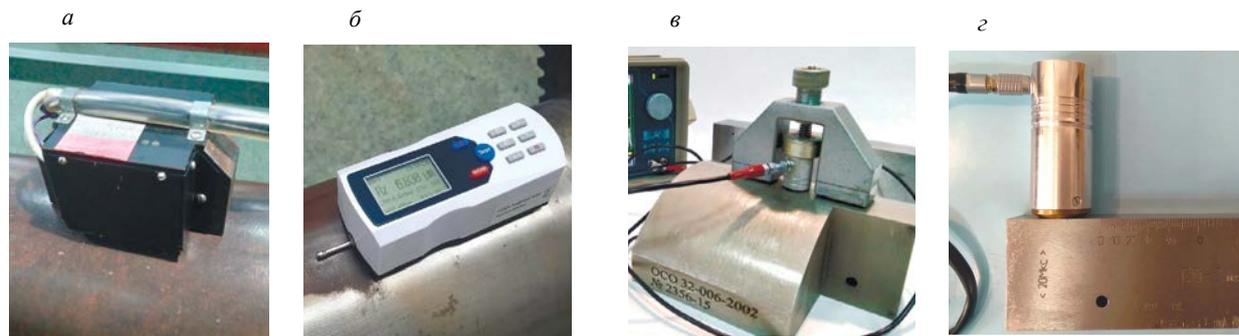


Рис. 2. Используемые средства и объекты контроля: ЭМА-преобразователь П411-2,5 (а) и профилограф (б) на цилиндрической поверхности оси колесной пары; пьезопреобразователь с магнитным фиксатором на образце ОСО 32-006-2002 (в); ЭМА-преобразователь П411-3-К18 на стандартном образце СО-2 (г).

Стабилизация акустического контакта ПЭП с поверхностью обеспечивалась магнитным фиксатором с регулируемой упругой пружиной. Сила прижатия фиксатора определялась с помощью лабораторных весов CAS-3000. Влияние изменения величины механической силы прижатия ПЭП на качество акустического контакта исследовано на образцах СО-2 и ОСО 32.006-2002.

Моделирование диаграмм направленности различных типов преобразователей выполнено в ПО «РАТАФС» и основанное на решении задач определения смещений в объекте контроля при возбуждении упругих волн различными способами (ПО № 2014660657 РФ. Программа моделирования акустических полей фазированных решеток преобразователей «РАТАФС Simulator»).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Негативное влияние шероховатости поверхности на амплитуду донного сигнала [23] следует учитывать при размещении прямых ПЭП на объектах не только плоской, но и цилиндрической формы. Помимо качества поверхности важным фактором является сила прижатия преобразователя к поверхности, которая будет меняться как от оператора к оператору, так и у одного оператора в течение рабочего дня.

На рис. 3 показано, что амплитуда сигнала, отраженного от плоской поверхности образца СО-2 на глубине 59 мм, увеличивается по мере роста силы прижатия к поверхности ввода, при этом на

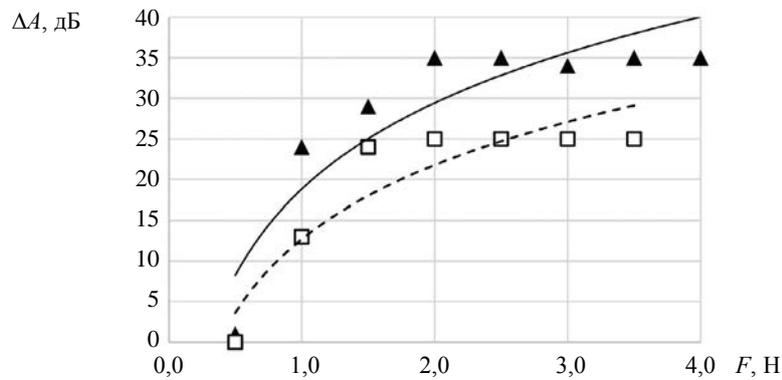


Рис. 3. Относительное изменение амплитуды донного сигнала ($y = 59$ мм) при увеличении силы F прижатия П111-5-6 к поверхностям: плоской (▲) на СО-2; цилиндрической (□) на ОСО 32-006-2002 (радиус кривизны 82,5 мм).

плоской поверхности удается достичь большей амплитуды. Этот факт следует учитывать при расчете эквивалентной чувствительности при переходе от плоского стандартного образца к контролю цилиндрического объекта.

В акустических исследованиях осей колесных пар магнитный фиксатор с ПЭП подстраивался так, чтобы сила прижатия сохранялась одинаковой при каждом измерении амплитуды донного сигнала, а перекося преобразователя относительно нормали к касательной был минимален. ЭМА-преобразователи дополнительной фиксации не требовали, их нормальное положение обеспечивалось за счет работы встроенной системы подмагничивания.

Падение амплитуды донного сигнала на средней части бывшей в эксплуатации оси относительно опорного уровня, полученного по СО-2 и измеренное разными преобразователями, представлено на рис. 4. График дополнен значением шероховатости поверхности Rz , которое было определено для каждого из исследуемых участков x_{ci} . Из результатов исключены участки, в которых было невозможно установить ЭМА-преобразователь П411-2,5 СЭМА или профилограф из-за их большой базы. По этой же причине в работе не рассматриваются участки шеек оси.

Шероховатость средней части оси № 010959 имела разброс от 9,5 до 32 мкм, при этом амплитудные значения распределились: от -16 до -22 дБ при контроле ЭМА-преобразователем П411-3-18 и дефектоскопом УД4Т; от -6 до -11 дБ при контроле структуроскопом СЭМА и П411-2,5; от -27 до $-39,5$ при контроле преобразователем П111-5-6 и дефектоскопом УД2-102ВД. Критерием браковки является разность амплитуд не более 8 дБ, таким образом, при неблагоприятной выборке трех точек для сравнения можно на данной оси получить разность более 12 дБ и перебраковать ось.

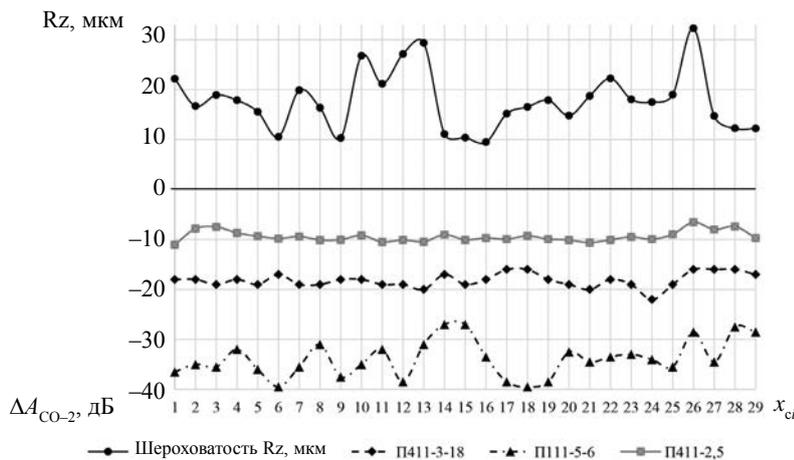


Рис. 4. Параметры шероховатости и падения амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, относительно СО-2 на сечениях x_{ci} средней части оси №010959.

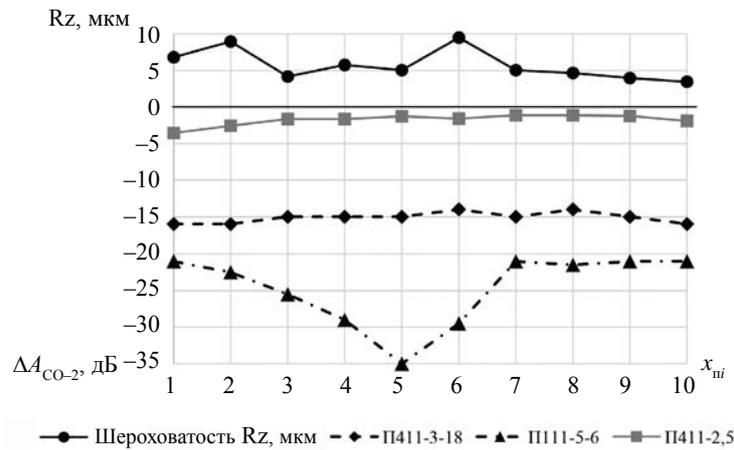


Рис. 5. Параметры шероховатости и падения амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, относительно СО-2 на сечениях x_{pi} подступичной части оси №559811.

Аналогичные результаты показаны на примере подступичной части оси № 559811, бывшей в эксплуатации, на рис. 5. Изменения шероховатости находились в пределах от 4 до 9,5 мкм, разница амплитуд между максимальным и минимальным значениями составила 2 дБ при контроле ЭМА-преобразователем П411-3-18 и дефектоскопом УД4Т; 3 дБ при контроле структуроскопом СЭМА и ЭМА-преобразователем П411-2,5; 14 дБ при контроле преобразователем П111-5-6 и дефектоскопом УД2-102ВД. Критерий браковки по разности в 8 дБ сохраняется для любого участка оси.

Результат, полученный после контроля средних частей четырех старогодных осей, показан на рис. 6. На диаграмме представлены разности значений донных сигналов в зависимости от ухудшения состояния поверхности (увеличения Rz); горизонтальной сплошной линией показан браковочный уровень 8 дБ. Очевидно, что вероятность перебраковки существенно возрастает при использовании ручного контроля с пьезопреобразователем.

Накопленная усталость металла, микроповреждения поверхности старогодных осей, несомненно, могут оказать влияние на амплитуду донных сигналов. Тем не менее амплитуда поперечной волны, которая является более чувствительной к структурным отклонениям, показала меньший разброс значений по сравнению с продольной волной, излученной пьезопреобразователем П111-5-6.

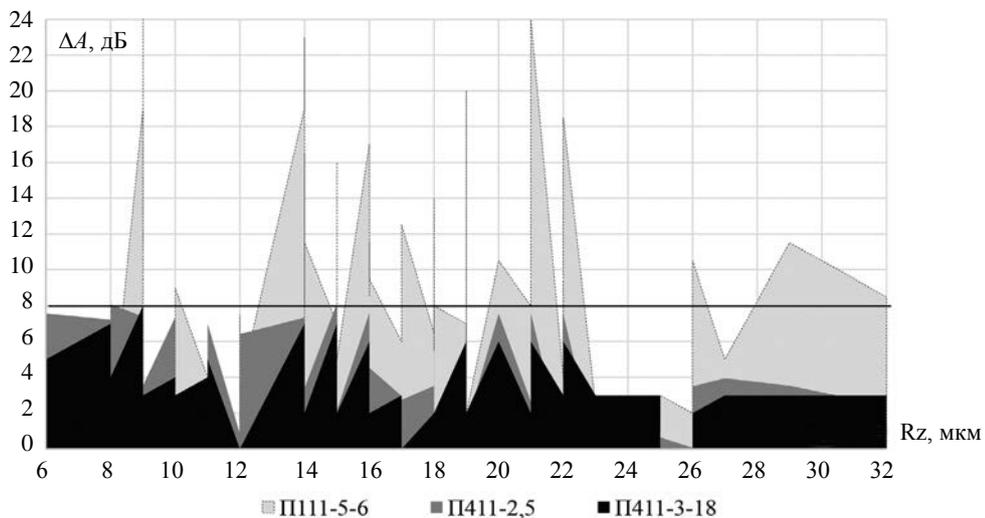


Рис. 6. Разность амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, на участках средней части старогодных осей в зависимости от шероховатости поверхности.

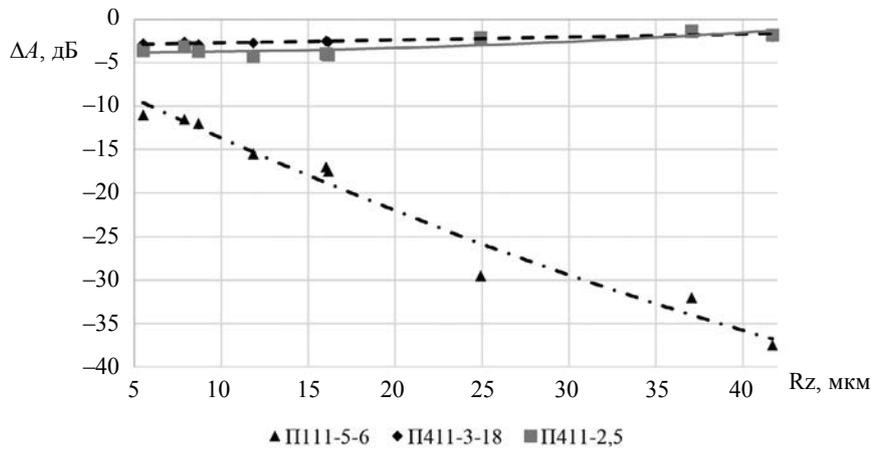


Рис. 7. Зависимость падения амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, на образце ОСО 32-006-2002 в зависимости от шероховатости поверхности ввода.

Для исключения возможного влияния структурного состояния и накопленной усталости осей эксперимент был проведен на одном и том же образце ОСО 32-006-2002, состояние поверхности которого менялось искусственно. Зависимость амплитуд донных сигналов, приведенных к СО-2, от шероховатости поверхности образца представлена на рис. 7. Амплитуды донных сигналов, полученных с помощью обоих ЭМА-преобразователей, менялись не более чем на 1 дБ, что сопоставимо со случайной погрешностью серийного дефектоскопа. Зарегистрированные с помощью контактного пьезопреобразователя П111-5-6 амплитуды при ухудшении качества поверхности показали значительное падение по закономерности, близкой к линейной.

Сравнение амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, дополнительно проведено на новых осях колесных пар автотомтрис на базе ПО «Камбарский машиностроительный завод», пример которых представлен на рис. 8.

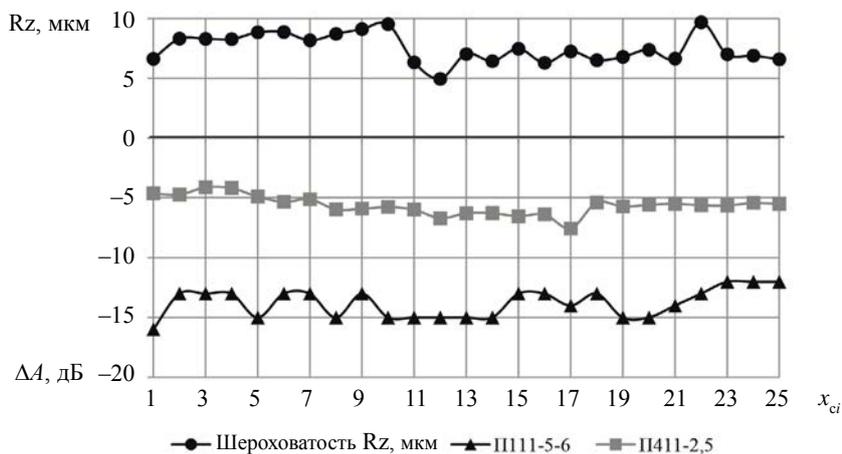


Рис. 8. Параметры шероховатости и падения амплитуд донных сигналов, полученных ЭМА и пьезопреобразователями, относительно СО-2 на сечениях x_i средней части новой оси № 2002116.

Качество поверхности на новых осях высокое, разброс шероховатости оказался в диапазоне от 5 до 10 мкм по шкале Rz. При этом интервал измеренных амплитуд донных сигналов преобразователем П111-5-6 и дефектоскопом УД2-102ВД составляет от -13 до -16 дБ; структуроскопом СЭМА с ЭМА-преобразователем П411-2,5 — от -4 до -7,5 дБ.

Выбор другого типа волны и рабочей частоты влечет за собой изменение уровней браковки. В работе проведена оценка чувствительности поперечных волн к таким структурным изменениям, которые бы соответствовали достижению браковочного критерия продольными волнами; для оценки использованы известные формулы расчета акустического тракта и коэффициентов затухания [24].

За опорный уровень A_0 выбрана амплитуда донного сигнала в образце СО-2. Сделано предположение, что три бездефектных плоскопараллельных образца толщиной 180 мм с разной структурой контролируются зеркально-теневым методом продольной волной с помощью преобразователя П111-5-6. Первый образец изготовлен из стали с зерном 0,02 мм, амплитуда донного импульса составляет A_1 ; во втором образце зерно отличается таким образом, что амплитуда донного сигнала A_2 падает в два раза (т.е. изменяется на 6 дБ) относительно первого. В третьем образце зерно крупнее настолько, что при контроле тем же преобразователем амплитуда донного сигнала A_3 падает в 2,51 раза (т.е. на 8 дБ) относительно первого образца.

Вычислены размеры зерен $D_{\text{зер}}$ стали, при которых амплитуда донного сигнала падает на 6 и 8 дБ, что соответствует браковочному критерию при контроле осей методом TR2 при ремонте и T2 при приемочном контроле новых осей соответственно. В табл. 1 приведены расчетные значения коэффициентов затухания δ_l и δ_p для продольной и поперечной волн соответственно.

Таблица 1

Расчетные значения размера зерна и коэффициентов затухания

Частота, f	Коэффициент затухания	Образец 1	Образец 2	Образец 3
		$D_{\text{зер}} = 0,02$ мм	$D_{\text{зер}} = 0,055$ мм	$D_{\text{зер}} = 0,06$ мм
5,0 МГц	δ_p 1/м	0,7	2,63	3,26
	δ_l 1/м	1,03	11,42	14,68
4,0 МГц	δ_p 1/м	0,52	1,33	1,59
	δ_l 1/м	0,62	4,87	6,21
3,0 МГц	δ_p 1/м	0,37	0,63	0,71
	δ_l 1/м	0,37	1,71	2,14
2,5 МГц	δ_p 1/м	0,31	0,43	0,47
	δ_l 1/м	0,28	0,93	1,14

По полученным коэффициентам δ и δ_l рассчитано падение амплитуды донного сигнала в плоскопараллельном образце высотой 180 мм при изменении размера зерна для разных типов волн и рабочих частот преобразователя. Значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Падение амплитуды донного импульса поперечной волны на разных частотах, соотнесенное с браковочным критерием для продольных волн

Тип волны	Продольная	Поперечная			
		5 МГц	4 МГц	3 МГц	2,5 МГц
Частота f , МГц	5 МГц	5 МГц	4 МГц	3 МГц	2,5 МГц
$A_1 - A_2$, дБ	6,0	32,5	13	4,2	2
$A_1 - A_3$, дБ	8,0	42,7	17	5,5	2,6

Поскольку требования (ГОСТ 34656—2020) ограничивают рабочую частоту преобразователя от 4 до 5 МГц, целесообразно для дальнейших исследований использовать П411-4. Несмотря на ограниченный браковочным критерием диапазон в 4,2 дБ при контроле дефектоскопом УД4-Т с преобразователем П411-3-18, потери чувствительности могут быть компенсированы за счет меньшей (по сравнению с УД2-102ВД) погрешности измерения амплитуды. Преобразователь П411-2,5

структуроскопа СЭМА интересен тем, что позволяет реализовать продольную (вдоль оси) поляризацию поперечной волны, что исключает влияние цилиндрической формы объекта на ее распространение.

Для полного решения вопроса о браковочных критериях необходимо провести экспериментальные исследования на образцах с измененной структурой преобразователями различного типа.

ВЫВОДЫ

Использование ЭМА-преобразователей с излучением поперечной волны при ультразвуковом контроле по варианту зеркально теневого метода с цилиндрической поверхности оси Т2 (TR2 — при ремонте) позволяет снизить вероятность ошибки в заключении по контролю, поскольку исключается влияние шероховатости поверхности, сила прижима, присущие при контроле пьезоэлектрическими преобразователями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов В.Н. К анализу сигналов, наблюдаемых при ультразвуковом контроле цилиндрического изделия прямым преобразователем с боковой поверхности // Дефектоскопия. 2004. № 11. С. 3—14.
2. Быкадоров В.В., Киреева М.А., Фатьянова О.А. Стабилизация акустического контакта для обеспечения метрологической точности измерений при ультразвуковом контроле цилиндрических деталей. Вестник Луганского национального университета им. Владимира Даля. 2020. № 7 (37). С. 35—38.
3. Казаков В.В. Амплитудно-фазовый метод контроля акустического контакта ультразвукового преобразователя // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 3—6. DOI: 10.1134/S0130308219030011
4. Данилов В.Н. О некоторых особенностях ультразвукового контроля осей колесных пар подвижного состава с боковой поверхности // Тяжелое машиностроение. 2019. № 10. С. 19—25.
5. Марков А.А., Иванов Г.А. Исследование способа обнаружения продольных трещин в головке рельса // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 46—56. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-46-56
6. Тарабрин В.Ф. Сопоставление характеристик искательных систем мобильных средств дефектоскопии рельсов // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 10 (268). С. 40—48.
7. Martynenko A.V. On the Issue of Interpretating Echograms in the Contact // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 1. P. 23—25. [Мартыненко А.В. К вопросу об интерпретации эхограмм при контактном способе акустического контакта // Дефектоскопия. 2022. № 1. С. 26—39. DOI: 10.31857/S0130308222010031]
8. Dymkin G.Ya., Kirikov A.V., Bondarchuk K.A. Immersion Testing of Curved Profile Objects by Surface Ultrasonic Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 8. P. 679—688. [Дымкин Г.Я., Кириков А.В., Бондарчук К.А. Иммерсионный контроль объектов криволинейного профиля поверхностными ультразвуковыми волнами // Дефектоскопия. 2022. № 8. С. 25—35. DOI: 10.31857/S0130308222080036]
9. Данилов В.Н. Модели расчета эхосигнала, регистрируемого наклонным преобразователем с прямоугольной пьезопластиной на образце СО-3 // Контроль. Диагностика. 2019. № 1. С. 4—15. DOI: 10.14489/td.2019.01.pp.004-015
10. Волкова Л.В., Платунов А.В. Использование многократного зеркально-теневого метода при ультразвуковом контроле пера подошвы рельса // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 38—45. DOI 10.22213/2413-1172-2019-4-38-45
11. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Рябов Д.А., Аносов М.С. Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 4. С. 18—26. DOI 10.22213/2413-1172-2022-4-18-26
12. Паврос С.К. О выборе оптимальной рабочей частоты для ультразвукового контроля эхо-методом изделий с цилиндрической грубообработанной поверхностью // Дефектоскопия. 1969. № 4. С. 53—58.
13. Ушаков В.М., Щербинский В.Г., Семькин И.В. Особенности формирования акустических полей наклонных преобразователей при контроле изделий со сферической поверхностью // Дефектоскопия. 1985. № 1. С. 34—39.
14. Данилов В.Н. К вопросу о влиянии цилиндрической границы изделия на поле излучения прямого преобразователя // Дефектоскопия. 1994. № 3. С. 72.
15. Мичуров А.В., Соколкин А.В. Поправочный коэффициент для корректировки амплитуды при ультразвуковом контроле эхометодом изделий с криволинейными поверхностями // Дефектоскопия. 2016. № 1. С. 18—29.

16. Дымкин Г.Я., Шелухин А.А., Анисимов В.Н. Совершенствование методики эхоимпульсного ультразвукового контроля рельсов при производстве // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 14—23. DOI 10.1134/S0130308219080025

17. Murav'eva O.V., Brester A.F., Murav'ev V.V. Comparative Sensitivity of Informative Parameters of Electromagnetic-Acoustic Mirror-Shadow Multiple Reflections Method during Bar Stock Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 8. P. 689—704. [Муравьева О.В., Брестер А.Ф., Муравьев В.В. Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката // Дефектоскопия. 2022. № 8. С. 36—51. DOI: 10.31857/S0130308222080048]

18. Петров К.В., Муравьева О.В., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 16—24. DOI: 10.1134/S0130308219020027

19. Муравьева О.В., Петров К.В. Акустическое поле, формируемое в условиях импульсного излучения—приема на поверхности эллиптического цилиндра // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 1. С. 110—119. DOI: 10.1134/S0320791919010064

20. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Петров К.В. Неразрушающий контроль цилиндрических изделий с использованием проходных электромагнитно-акустических преобразователей / Монография. Ижевск: Изд-во Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2022. 220 с.

21. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Vladykin A.L. Acoustic and Electromagnetic Properties of Maraging Iron–Chromium–Nickel Alloy with Addition of Copper in Mechanical Tension // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. V. 59. No. 5. P. 515—523. [Муравьев В.В., Муравьева О.В., Владыкин А.Л. Акустические и электромагнитные свойства мартенситно-старящего железохромоникелевого сплава с добавлением меди при механическом растяжении // Дефектоскопия. 2023. № 5. С. 12—20. DOI: 10.31857/S0130308223050020]

22. Муравьев В.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 12. С. 52—57.

23. Дымкин Г.Я., Лохов В.П. Еще раз о влиянии шероховатости поверхности изделия на результаты УЗК прямыми ПЭП // В мире неразрушающего контроля. 2007. № 1 (35). С. 25—26.

24. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Богдан О.П., Платунов А.В. Ультразвуковой контроль. Физические основы / Учеб. пособие для студ. вузов и профессиональной подготовки специалистов в области неразрушающего контроля. Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. 128 с.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

© 2023 г. Г.Т. Весала^{1,*}, В. С. Гхали², Ю. Нага Прашант^{2,3}, Б. Суреш²

¹Университет Малларедди, Хайдарабад, Телангана, Индия-500004

²Образовательный фонд Конеру Лакшмайя, Ваддесварам, штат Андхра-Прадеш, Индия

³Институт инженерии и технологий им. Дханекулы, Гангуру, штат Андхра-Прадеш, Индия

E-mail: *gopitilak7@gmail.com

Поступила в редакцию 22.07.2023; после доработки 15.08.2023

Принята к публикации 22.08.2023

В ходе революции NDT 4.0 машинное обучение и искусственный интеллект стали основными факторами, способствующими развитию неразрушающего контроля (НК) промышленных компонентов. Однако последние разработки в области активного теплового неразрушающего контроля (ТК) подтверждают его использование в качестве практического метода контроля целого ряда промышленных компонентов. Кроме того, в ходе последних исследований в области постобработки в ТК было разработано несколько моделей машинного обучения, позволяющих заменить взаимодействие с человеком и обеспечить автоматическое обнаружение дефектов. Но меньшая площадь дефектов и связанные с ними несколько тепловых профилей по сравнению с широкой зоной прозвучивания, приводящие к несбалансированности наборов данных, затрудняют обучение с учителем глубокой нейросети. Недавно в ТК были добавлены модели обнаружения аномалий и одноклассовые классификаторы, которые являются широко применяемыми моделями машинного обучения для решения реальных задач. Аккуратность и другие важные показатели при автономном обнаружении дефектов зависят от гиперпараметров этих моделей, таких как коэффициент загрязнения, объем обучающих данных и параметр инициализации соответствующей модели. В данной работе исследуется влияние параметров инициализации на возможности этих моделей в области ТК для автоматической дефектоскопии. С помощью метода отображения квадратичной частотно-модулированной тепловой волны (КЧМТВ) исследован образец полимера, армированного углеродным волокном, с искусственно созданными отверстиями различного размера на разной глубине. После качественного сравнения аккуратности, точности, полноты, F-меры и вероятности контроля был выбран хороший гиперпараметр для автоматической идентификации дефектов.

Ключевые слова: модели обнаружения аномалий, автоматическое обнаружение дефектов, выбор гипер-параметра, квадратичная частотно-модулированная тепловая волна и тепловой неразрушающий контроль.

PARAMETRIC STUDY OF ANOMALY DETECTION MODELS FOR DEFECT DETECTION IN INFRARED THERMOGRAPHY

G.T. Vesala^{1,*}, V.S. Ghali², Y. Naga Prasanthi^{2,3}, B. Suresh²

¹Mallareddy University, Hyderabad, Telangana, India-500004.

²Koneru Lakshmaiah Educational Foundation, Vaddeswaram, Andhra Pradesh, India.

³Dhanekula Institute of Engineering & Technology, Ganguru, A.P, India.

E-mail: *gopitilak7@gmail.com

In the current NDT 4.0 revolution, machine learning and artificial intelligence have emerged as the major enablers for non-destructive testing and evaluation (NDT&E) of industrial components. However, recent developments in active thermal NDT (TNDT) support its use as a practical method for checking a range of industrial components. Additionally, recent post-processing research in TNDT has developed several machine learning models to replace human interaction and offer automatic defect detection. However, the smaller area of the flaws and their related few thermal profiles than the wide sound area, leading to imbalanced datasets, make it difficult to train a supervised deep neural. Recently added to TNDT are anomaly detection models and one-class classifiers, both of which are commonly applied machine learning models to real-world issues. The accuracy and other important metrics in autonomous defect detection are influenced by the hyper-parameters of these models, such as contamination factor, volume of training data, and initialization parameter of the relevant model. The current paper investigates how initialization parameters affect these models' TNDT capabilities for automated flaw detection. Using quadratic frequency modulated thermal wave imaging (QFMTWI), a carbon fiber-reinforced polymer specimen with variously sized artificially produced back-holes at different depths is examined. A good hyper-parameter for automatic flaw identification is chosen after qualitatively comparing testing accuracy, precision, recall, F-score, and probability.

Keywords: anomaly detection models, automatic defect detection, hyper-parameter selection, quadratic frequency modulated thermal wave imaging and thermal non-destructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308223120023, EDN: XEZEIV

ВВЕДЕНИЕ

Машинное обучение и искусственный интеллект стали основными направлениями современной революции в области неразрушающего контроля (NDE 4.0) для автоматизации задач обнаружения и определения характеристик дефектов в различных технологиях неразрушающего контроля [1]. С другой стороны, активный тепловой неразрушающий контроль (ТНК) на основе оптической стимуляции стал эффективным методом неразрушающего контроля для безопасного, дистанционного, бесконтактного контроля различных промышленных компонентов с возможностью проведения контроля в пределах всей поверхности [2]. С момента появления ТНК различные способы стимуляции развивались от высокой пиковой мощности до низкой пиковой мощности и от быстрой до длительной с помощью различных методов модуляции. Регистрируемые тепловые данные являются трехмерными (записываются в виде видеопоследовательности); они отображают информацию о дефекте всеми способами: одномерными временными тепловыми профилями, двухмерными термограммами и трехмерными пространственно-временными данными. В общем случае для получения признаков дефекта и его характеристик используются методы обработки пространственных или временных деталей тепловых данных [3]. Однако последние достижения в области постобработки для автоматизации этих процедур привели к появлению различных моделей машинного обучения (МО) и глубокого обучения (ГО) в ТНК [4]. Эти модели развивались для трех типов тепловых данных для автоматической идентификации дефектов, включая подходы обучения с учителем, без учителя, с частичным привлечением учителя [5—19].

В трехмерной перспективе глубокие признаки или структуры пространственной и временной информации в тепловых данных отдельно извлекаются и объединяются с помощью комбинации сверточных нейронных сетей (СНС) и долгой краткосрочной памяти (ДКП) [5] и только СНС [6] достичь уровня выявления дефектов. В первом случае, временные признаки извлекаются с помощью ДКП, а архитектура СНС U-net предоставляет глубокие признаки пространственной информации. Во втором случае используется псевдо3D внимательная нейросеть с использованием пространственно-временных сверток по главным компонентам, извлеченным из тепловой записи. Как и U-net, контроль дефектов было представлено в виде задач идентификации объектов и семантической сегментации объектов путем извлечения глубинных паттернов на термограммах с использованием подходов трансферного обучения [7—9]. Процедура идентификации объектов осуществляется с помощью региональных моделей СНС, таких как региональная СНС (P-СНС), быстрая P-СНС и сети «you only look once» (YOLO) [7], в то время как задача сегментации решается с помощью предварительно обученной архитектуры U-net [8]. Сочетание идентификации объекта через ограничительную рамку и сегментации объекта через P-СНС с построением масок в совокупности со стратегией обучения функции потерь представлено в [9]. Помимо автоматического обнаружения дефектов, для повышения эффективности обнаружения дефектов используются такие подходы к обучению на основе состязательности, как автокодирование и генеративные состязательные сети [10, 11].

Помимо таких многомерных форматов данных, в настоящей работе основное внимание уделяется одномерным временным тепловым профилям, на основе которых в ТНК было применено МО [12]. Однако в последнее время наблюдается развитие различных моделей МО и ГО в ТНК [13—19]. Хорошо известно, что признаки временных тепловых профилей одинаковы в бездефектных областях и различаются для дефектных областей в зависимости от параметров дефекта. Поэтому для корректного обучения МО- или ГО-моделей необходимо случайным образом выбирать соответствующие обучающие данные как из дефектных, так и из недефектных областей [13—15]. С другой стороны, в работах [16, 17] рассматривается проблема меньшего количества тепловых профилей дефектных областей, приводящая к несбалансированности классов данных для обучения, и применяются подходы, основанные на обучении с частичным привлечением учителя или взвешенной перекрестной энтропии потерь. Данная проблема дисбаланса классов подчеркивается, и задача обнаружения дефектов формулируется как задача обнаружения аномалий или одноклассовой классификации, где отрицательных или аномальных экземпляров очень мало по сравнению с положительными или нормальными данными. Поэтому для автоматического обнаружения дефектов вначале анализируются известные модели обнаружения аномалий (МОА), а затем их более глубокие версии путем обучения только на тепловых профилях недефектных участков [18, 19]. В отличие от моделей сквозного обучения, эти МОА зависят от параметров инициализации, таких как объем обучающих данных, фактор загрязнения и соответствующие параметры инициализации.

В данной работе проводится качественный анализ влияния параметров инициализации МОА для автоматического обнаружения дефектов. Исследование параметров проводится на образце полимера, армированного углеродным волокном (ПАУВ), с дефектами в виде отверстий с плоским дном различных размеров на разной глубине, контролируемых методом квадратичной частотно-модулированной тепловой волны (КЧМТВ). Такие качественные показатели, как количество выявленных дефектов, аккуратность тестирования или классификации, точность, полнота, F -мера и вероятность обнаружения дефектов, определяют оптимальные параметры инициализации для автоматического распознавания дефектов. Кроме того, еще одним преимуществом МОА является наличие в них коэффициента выброса, которые представляют собой дефекты, похожие на термограммы, при которых можно достичь соотношения сигнал/шум дефекта, что в большей степени подчеркивает возможности МОА по классификации дефектов.

Работа выстроена следующим образом: в разделе 2 обосновывается необходимость анализа параметров инициализации МАО. В разделе 3 представлены материалы, эксперименты и подробное описание тепловых характеристик, а в разделе 4 — результаты и их обсуждение. Наконец, в разделе 5 приводятся краткие выводы по работе.

МОДЕЛИ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ

В отличие от обычных задач компьютерного зрения, существует несколько приложений, в которых большинство данных остаются стандартными, а аномалии возникают в редких случаях. К таким случаям относятся обнаружение нововведений, мошеннических операций с кредитными картами, идентификация дефектных объектов, идентификация посторонних объектов и т.д. В общем случае модели МО страдают от нехватки данных, относящихся к классам, достаточным для обучения в таких случаях, и лучшей альтернативой для решения этой проблемы являются модели обнаружения аномалий (MAO) или одноклассовые классификаторы [20]. MAO способны выявлять редкие случаи или выбросы в данных путем обучения только на нескольких нормальных случаях.

В данном случае ТНК представляет собой механизм контроля широкой области, обеспечивающий получение пространственно-временных тепловых данных высокого разрешения, где временная информация на каждом пикселе соответствует тепловому отклику объекта контроля на заданный стимул. В большинстве случаев наблюдается, что большая часть временных тепловых профилей относится к бездефектным областям и лишь немногие из них приходятся на дефектные участки [16]. Кроме того, признаки тепловых профилей практически одинаковы в случае бездефектных областей, в то время как они изменяются в зависимости от параметров дефекта, таких как размер, глубина, тип и геометрическая ориентация. Эти две характеристики тепловых данных обуславливают формулировку задачи обнаружения дефектов как задачи обнаружения аномалий или одноклассовой классификации. Поэтому в наших предыдущих работах [18, 19] исследовалась возможность использования MAO для обнаружения дефектов, когда были рассмотрены и проанализированы известные MAO. В качестве MAO были выбраны одноклассовый метод опорных векторов (ОМОВ) [21], изолированный лес (ИЛ) [22] и локальный коэффициент выбросов (ЛКВ) [23], каждый из которых использует свою специфику для классификации аномальных случаев. Чтобы лучше понять их применимость для ТНК, читателям следует обратиться к [18].

Среди этих методов ОМОВ использует параметрический подход, аналогичный методу опорных векторов, ИЛ использует меры, основанные на расстоянии, а ЛКВ вычисляет отношение плотностей. Таким образом, производительность MAO зависит от параметров инициализации, таких как объем обучающих данных, фактор загрязнения и параметр инициализации. Во-первых, обучающие данные — это нормальный или положительный класс, в данном случае тепловые профили бездефектных участков. Коэффициент загрязнения — общий для всех MAO параметр инициализации, который представляет собой ожидаемое соотношение выбросов, наблюдаемых на практике, и отвечает за формирование порога для классификации аномальных и нормальных случаев. Наконец, параметры инициализации различны для каждого из этих MAO. В ОМОВ для эффективного построения гиперплоскости [21] требуется параметр, похожий на дисперсию, как часть ядра, выбранного для построения гиперплоскости. В ИЛ требуется случайное число, чтобы метод извлекал случайные признаки и вычислял среднюю длину пути для выявления аномалий [22]. С другой стороны, в ЛКВ требуется число «MinPts» — количество ближайших соседей, с которыми вычисляется локальная плотность достижимости, дающая локальный коэффициент выброса [23]. Таким образом, эти параметры играют ключевую роль в обеспечении баланса между эффективностью классификации аномалий и показателями производительности. В данной работе рассматривается оптимальный выбор этих параметров для обнаружения дефектов в ТНК в зависимости от целей

обнаружения дефектов, показателей производительности и ограничений по надежности.

Метрики производительности, которые рассматриваются для получения оптимальных параметров инициализации: для оценки производительности по следующим метрикам берутся предварительно заданные метки:

$$\begin{aligned}
 \text{Аккуратность} &= \frac{\text{ИП} + \text{ИО}}{\text{ИП} + \text{ЛП} + \text{ЛО} + \text{ИО}}; \\
 \text{Точность} &= \frac{\text{ИП}}{\text{ИП} + \text{ЛП}}; \\
 \text{Полнота или ДИПК} &= \frac{\text{ИП}}{\text{ИП} + \text{ЛО}}; \\
 F\text{-мера} &= \frac{(2 \times \text{Точность} \times \text{Полнота})}{(\text{Точность} + \text{Полнота})}; \\
 \text{ДЛПК} &= \frac{\text{ИП}}{\text{ИП} + \text{ЛО}},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где ИП — количество пиксельных профилей, правильно предсказанных как дефектные; ИО — количество пиксельных профилей, идеально предсказанных как недефектные. Аналогично, ЛП — количество профилей пикселей недефектного класса, предсказанных как дефектные; а ЛО — количество профилей пикселей дефектного класса, предсказанных как недефектные. Первая метрика — это аккуратность тестирования, которая выражается отношением истинных прогнозов к общему числу прогнозов, взятому в процентах. В отличие от глобального характера аккуратности, точность, полнота и F-мера являются локальными показателями для каждого класса данных, представляющими собой количество истинных предсказаний и ложных срабатываний. F-мера представляет собой сбалансированное арифметическое отношение точности и полноты, которое широко используется для классификации несбалансированных по классам данных [18]. Наконец, Доля ложных положительных классификаций (ДЛПК) — это мера, рассматриваемая для анализа надежности, которая, с другой стороны, рассматривается как вероятность обнаружения дефекта (ВОД) [19]. Здесь ИП дает количество пикселей, присутствующих в дефекте на образце, идентифицированном моделью, а ЛО — количество пикселей в области дефекта, которые модель не может предсказать. ВОД гораздо более локален и дает отношение истинных предсказаний на каждом уровне дефекта, построенное в зависимости от соотношения сторон (диаметр/глубина). Однако пороговым значением для признания модели ГО надежной считается доверительная оценка 75 %. Опять же, квадратная граница, определенная в ходе процедуры маркировки, помогает вычислить ВОД для каждого дефекта.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

Материалы и планирование эксперимента. Важной задачей является обнаружение дефектов меньших размеров на больших глубинах, а также анализ и выбор оптимальных параметров для новых методов обработки данных. Поэтому для анализа изменения параметров инициализации МАО при распознавании мелких и крупных дефектов выбраны образцы из углепластика с искусственно просверленными плоскими донными отверстиями разных размеров на разной глубине. Схема конструкции образца представлена на рис. 1а. Лицевая поверхность образца покрыта черной краской с излучательной способностью 0,95 для получения равномерной излучательной способности по всей поверхности [18].

Передняя поверхность образца освещается оптическим импульсом мощностью 2 кВт с квадратичной частотной модуляцией в диапазоне от 0,01 до 0,1 Гц в течение 100 с с помощью набора галогенных ламп пиковой мощностью 1 кВт каждая [18]. Для исключения фазы охлаждения во время эксперимента к возбуждению добавляется смещение по постоянному току. Соответствующий тепловой отклик регистрируется тепловизором FLIRSC655A, работающим в спектральном диапазоне от 7,5 до 14 мкм с погрешностью ± 2 °С или ± 2 % от показаний и эквивалентной шуму разностью температур (ЭШРТ) или чувствительностью 30 мк при частоте 6,25 кадра в секунду при полном разрешении 640x480 пикселей. Экспериментальная установка ТНК, размещенная в центре инфракрасной диагностики KLEF, показана на рис. 1б.

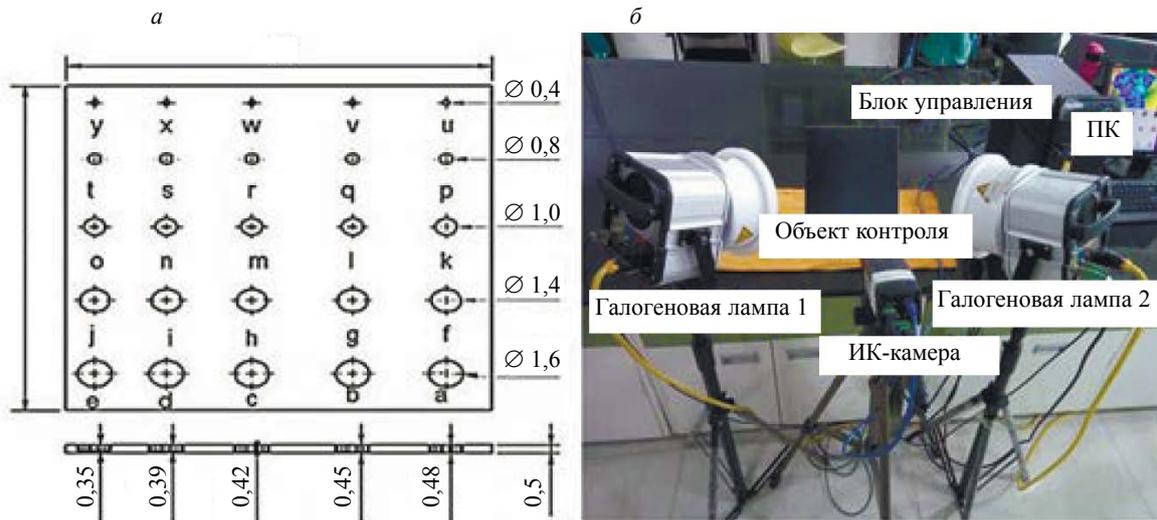


Рис. 1. Схематическое изображение образца (а) (размеры в см) и экспериментальная установка ТНК (б).

Предобработка данных и их обработка. Эффективный исходный тепловой отклик образца без фона определяется операцией кадрирования. Эффективная исходная тепловая характеристика только испытуемого образца состоит из 625 тепловых кубов с разрешением 315×317 пикселей. Исходный тепловой отклик состоит из статической и динамической составляющих, где статическая составляющая — это среднее повышение температуры, а динамическая составляющая — реальный тепловой отклик. Таким образом, статическая составляющая во временной тепловой картине каждого пикселя в поле зрения устраняется, а среднее значение удаляется с помощью соответствующей процедуры подгонки полинома [18]. Полученный тепловой профиль снова переставляется в соответствующее местоположение пикселя для создания предварительно обработанного теплового куба. Далее линейно подогнанный куб термограмм сопоставляется с истинными метками для проверки предложенной методики.

Поскольку задача формулируется как задача обнаружения аномалий, каждому пикселю присваиваются положительные и отрицательные метки. Тепловые профили в области дефекта связываются с отрицательным классом (-1), а бездефектная область маркируется как положительный класс ($+1$), что показано на рис. 2а. Эта карта меток добавляется к тепловым данным, подготовленным выше, и далее из них извлекаются обучающие данные. Карта меток состоит из 99855 (315×317) пиксельных профилей, из которых 6045 принадлежат области дефектов, а 93810 покрывают область без дефектов. На рис. 2б представлен случайный выбор из тепловых данных

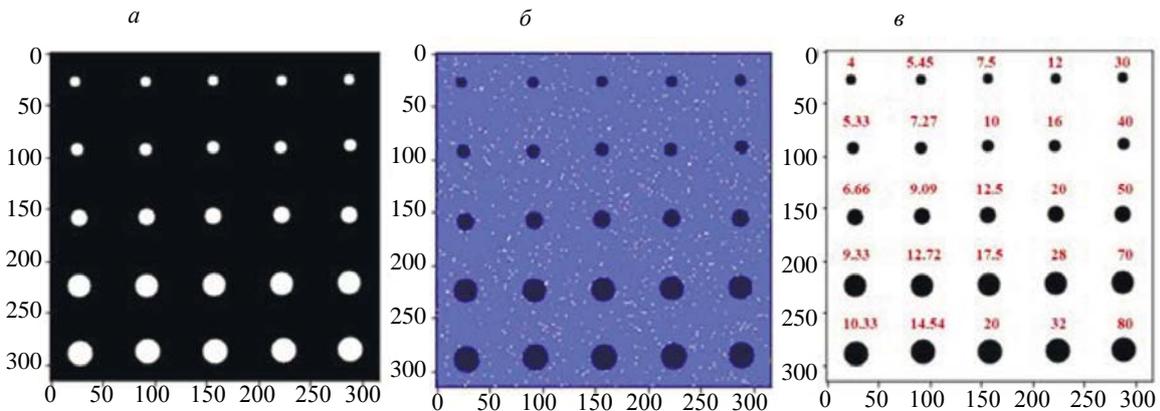


Рис. 2. Эталонные данные (а); случайная выборка обучающих данных из тепловых данных (б); соотношение сторон каждого дефекта (в).

тепловых профилей бездефектных областей, которые покрывают ближайшие участки дефектных областей, для лучшего понимания MAO. Обучающие данные, взятые из бездефектной области, подаются в MAO в виде двумерного вектора, представляющего собой тепловой профиль в каждой строке. Аналогичным образом данные тестирования теплового отклика всего образца преобразуются в двумерный вектор и подаются в MAO в процессе тестирования. В результате тестирования для каждого теплового профиля получаются результаты классификации в виде одномерного вектора, который далее преобразуется в реальное измерение термограммы и визуализируется в виде карты дефектов. Наконец, на рис. 2*в* представлены соотношения сторон всех дефектов, которые представляют собой отношение диаметра дефекта к его глубине для анализа ВОД, как показано в уравнении (1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сначала варьируются обучающие данные путем изменения количества случайно выбранных тепловых профилей бездефектных областей от 500 до 8000 (500, 1к, 2к, 4к, 6к и 8к), при этом остальные параметры остаются неизменными. Коэффициент загрязнения остался равным 0,2, а параметры ядра, случайного зерна и «MinPts» для ОМОВ, ИЛ и ЛКВ выбраны равными 0,0001, 42 и 80 соответственно. Метрики эффективности, приведенные в уравнении (1), позволяют лучше понять влияние каждого параметра инициализации на обнаружение дефектов, что проиллюстрировано на рис. 3. Первоначально наблюдение за картами дефектов показало, что в них имеются незначительные различия, но количество обнаруженных дефектов остается неизменным для ОМОВ и ИЛ. ОМОВ не смог обнаружить шесть дефектов в левой верхней части, которые имеют небольшой размер и лежат на глубинах от средних до больших. С другой стороны, ИЛ незначительно превзошел ОМОВ, обнаружив на один дефект больше при 1 тыс. обучающих данных. Однако, как видно из рис. 3*а* и *б*, показатели эффективности для этих двух случаев остаются в основном неизменными или незначительно изменяются.

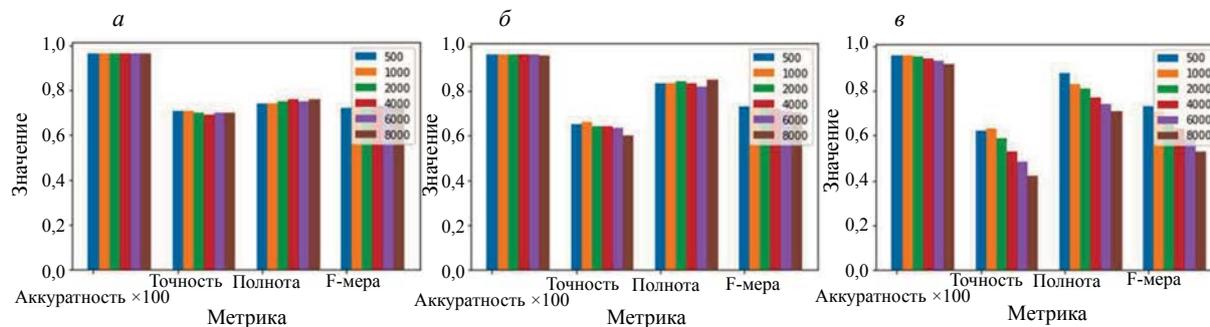


Рис. 3. Оценка эффективности моделей анализа аномалий при варьировании данных для обучения: ОМОВ (*а*); ИЛ (*б*); ЛКВ (*в*).

Значения ВОД для всех дефектов для каждого случая трех MAO рассчитаны и представлены на рис. 4 в виде графиков. В каждой ячейке представлены значения ВОД для всех 25 дефектов в каждом случае с соответствующими медианой, верхней и нижней границами. Из рисунка видно, что для ОМОВ и ИЛ значения ВОД не меняются в зависимости от обучающих данных. С другой стороны, для ВОД наблюдались изменения в показателях эффективности, поскольку при увеличении объема обучающих данных были исследованы почти все дефекты, что привело к компромиссу в отношении ошибочных классификаций. Это еще больше усиливает метрики производительности, наблюдаемые на рис. 3*в*. Это объясняется относительным эффектом ЛКВ по отношению к соседним элементам; с увеличением количества данных увеличивается количество ближайших элементов, что приводит к ошибкам классификации и, соответственно, к падению accurateness, точности, полноты и ВОД, как видно на рис. 3*в* и 4*в*, соответственно. Аналогично, наблюдая медиану ВОД на рис. 4, можно сделать вывод, что медиана уменьшается, а верхняя и нижняя границы ВОД напоминают увеличение числа ложных срабатываний.

Во-вторых, коэффициент загрязнения изменяется от 0,05 до 0,3 с шагом 0,05 в каждом цикле, при этом остальные параметры остаются неизменными. В качестве обучающих данных использу-

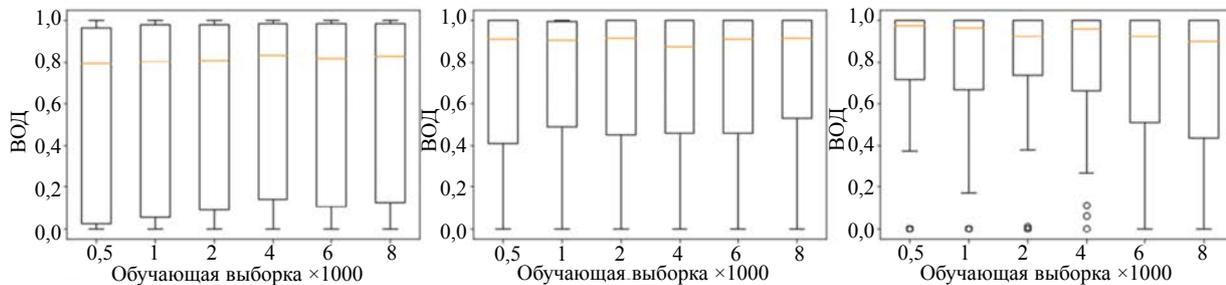


Рис. 4. Анализ ВОД для разных МАО при варьировании данными обучения: ОМОВ (а); ИЛ (б); ЛКВ (в).

ются 1к тепловых профилей, а параметры инициализации соответствующих МАО остаются такими же, как и ранее. Предварительное наблюдение за картами дефектов показывает, что при увеличении коэффициента загрязнения в каждой МАО наблюдается увеличение количества выявленных дефектов. Количество выявленных дефектов при увеличении коэффициента загрязнения выглядит следующим образом: ОМОВ обнаруживает от 16 до 19 дефектов, ИЛ — от 16 до 20 дефектов, а ЛКВ — от 19 до 23 дефектов при изменении коэффициента загрязнения от 0,05 до 0,3. Однако увеличение числа обнаруженных дефектов привело к незначительному снижению аккуратности и точности, но к увеличению полноты и F-меры, как видно из рис. 5. Это свидетельствует о благоприятных показателях МАО при изменении коэффициента загрязнения.

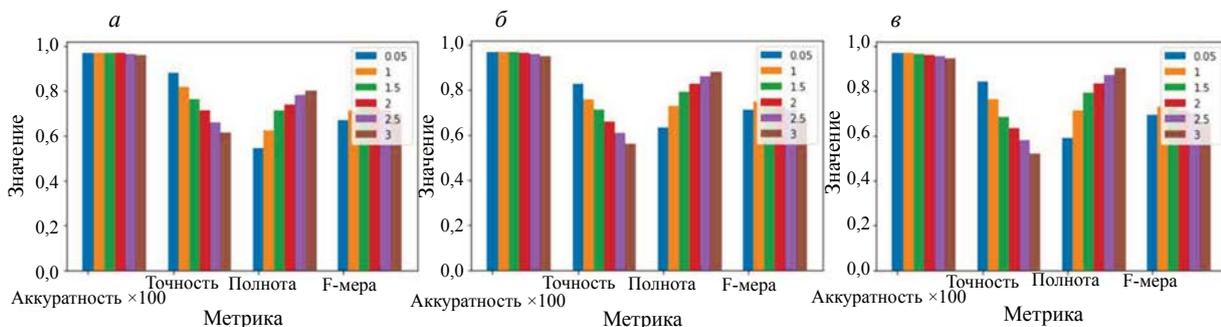


Рис. 5. Оценка эффективности моделей анализа аномалий при варьировании коэффициента загрязнения: ОМОВ (а); ИЛ (б); ЛКВ (в).

Дальнейшее рассмотрение ВОД на рис. 6 показывает, что ВОД для дефектов увеличивается при повышении коэффициента выбросов, так как медианные значения пересекают пороговый уровень (75) для всех случаев после 0,2. Комбинированный анализ метрик эффективности показывает, что увеличение коэффициента загрязнения приводит к снижению точности, но, с другой стороны, увеличивает полноту и F-меру по мере увеличения количества обнаруженных дефектов и обеспечивает лучшую ВОД для всех обнаруженных дефектов. Однако на картах дефектов видно, что увеличение коэффициента загрязнения приводит к снижению порога обнаружения, что приводит к ошибочной классификации бездефектных участков на границах дефектов и на границах образцов как дефектных. Поэтому оптимальный коэффициент загрязнения 0,2 выбирается путем компромисса между возможным максимальным количеством обнаруженных дефектов и меньшим количеством ошибочных классификаций.

Наконец, варьируется отдельный инициализатор трех МАО и анализируется эффективность, при этом количество обучающих данных и коэффициент загрязнения составляют 1000 и 0,2 соответственно. Параметр ядра для ОМОВ изменяется от 0,1 до 0,000001, случайное зерно для ИЛ и «MinPts» для ЛКВ изменяются от 10 до 100 (10, 20, 40, 60, 80 и 100). Соответствующие параметры эффективности и надежности представлены на рис. 7 и 8 соответственно. В первую очередь наблюдение за картами дефектов показывает, что случайное зерно ИЛ характеризуется небольшим

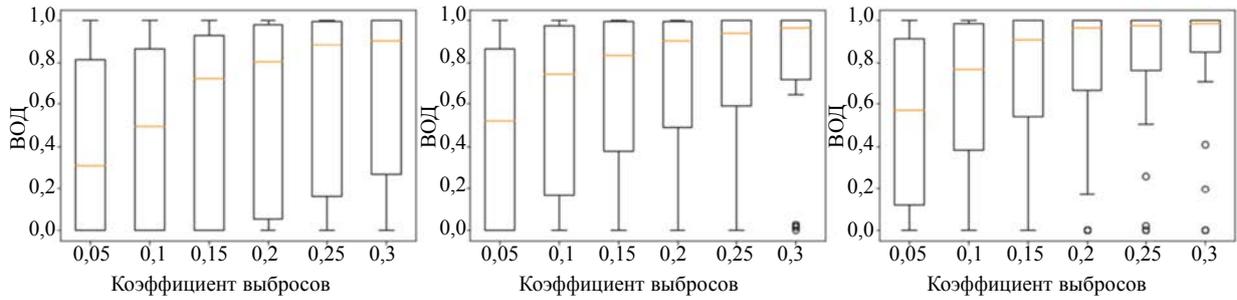


Рис. 6. Анализ ВОД для разных МАО при варьировании коэффициента загрязнения: ОМОВ (а); ИЛ (б); ЛКВ (в).

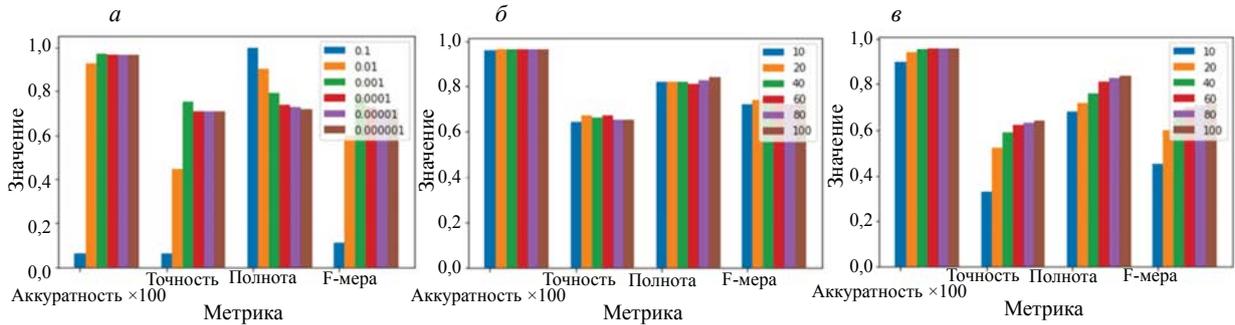


Рис. 7. Оценка эффективности моделей анализа аномалий при варьировании инициализатора для ОМОВ (а); ИЛ (б); ЛКВ (в).

разбросом при обнаружении дефектов, где количество обнаруженных дефектов варьируется в пределах 19-20. Это подтверждается и показателями эффективности и ВОД, представленными на рис. 7б и 8б соответственно. Таким образом, очевидно, что случайное зерно не оказывает существенного влияния на производительность ИЛ.

С другой стороны, параметр ядра существенно влияет на функцию принятия решения ОМОВ, так как при меньших значениях на данные в многомерном пространстве накладываются жесткие замкнутые поверхности, а при больших значениях — свободные [21]. Жесткая оболочка позволяет выделить большую часть данных, в то время как свободная оболочка представляет все данные как единый набор. Таким образом, карты дефектов показывают отсутствие тепловых профилей областей дефектов для самого высокого параметра ядра (0,1), что видно из метрик производительности и ВОД-графиков на рис. 7а и 8а соответственно. Однако можно заметить, что при дальнейшем уменьшении значения параметра ядра значение полноты и медиана ВОД уменьшаются с ростом числа обнаруженных дефектов. Поэтому для сравнительного исследования, представленного в дальнейшей части, выбрано промежуточное значение 0,0001, позволяющее обнаружить 19 дефектов с приемлемым медианным значением ВОД.

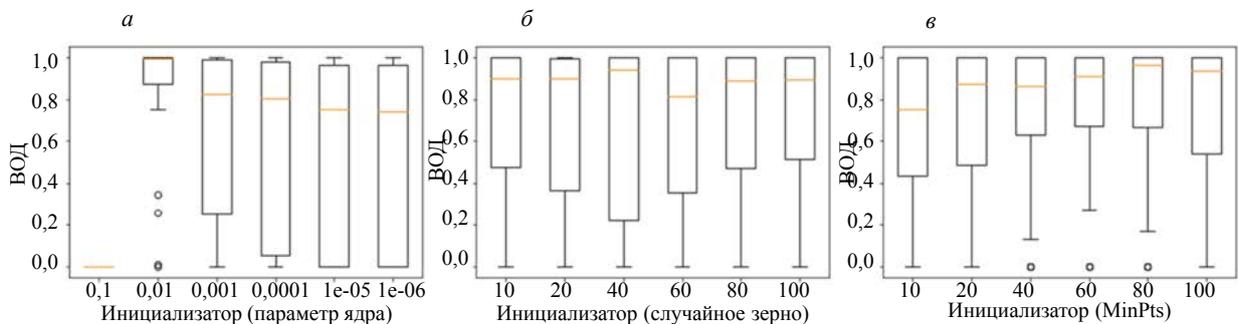


Рис. 8. Анализ ВОД для разных МАО при варьировании инициализатора для ОМОВ (а); ИЛ (б); ЛКВ (в).

В случае ЛКВ первоначально было выбрано значение MinPts, равное 10, поскольку оно является нижней границей для устранения нежелательных статистических флуктуаций и может быть увеличено до достижения оптимального значения [23]. При первичном наблюдении карт дефектов видно, что при меньших значениях 'MinPts' (10 и 20) было обнаружено 22 дефекта с большим количеством ошибок классификации, так как статистические флуктуации в данных все еще влияют на его эффективность. Дальнейшее увеличение значения 'MinPts' приводит к ограничению числа обнаруживаемых дефектов до 22, что снижает количество ложных заключений. Рис. 7в и 8в еще больше подтверждают это наблюдение, поскольку наблюдается рост эффективности метрик и ВОД. Таким образом, для анализа в предыдущем разделе выбрано подходящее значение 'MinPts', равное 80, так как в этом случае получается самая высокая медиана для ВОД.

На основании проведенного анализа были выбраны следующие оптимальные параметры: обучающие данные — 1000 тепловых профилей бездефектной области, коэффициент загрязнения — 0,2, параметр ядра для ОМОВ — 0,0001, случайный инициализатор для ИЛ — 42, а «MinPts» для ЛКВ — 80. Соответствующие карты дефектов для этих оптимальных параметров представлены на рис. 9, где ЛКВ обнаружила наибольшее количество дефектов (22), опередив ОМОВ и ИЛ. С другой стороны, время обучения и тестирования показывает, что ОМОВ затрачивает гораздо меньше времени на обучение и тестирование, в то время как ИЛ и ЛКВ — умеренное и длительное время на обучение и тестирование, соответственно. Однако показатели эффективности, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что ОМОВ демонстрирует лучшие показатели аккуратности и F-меры, а также высокое значение полноты, по которому ИЛ и ЛКВ превосходят ОМОВ.

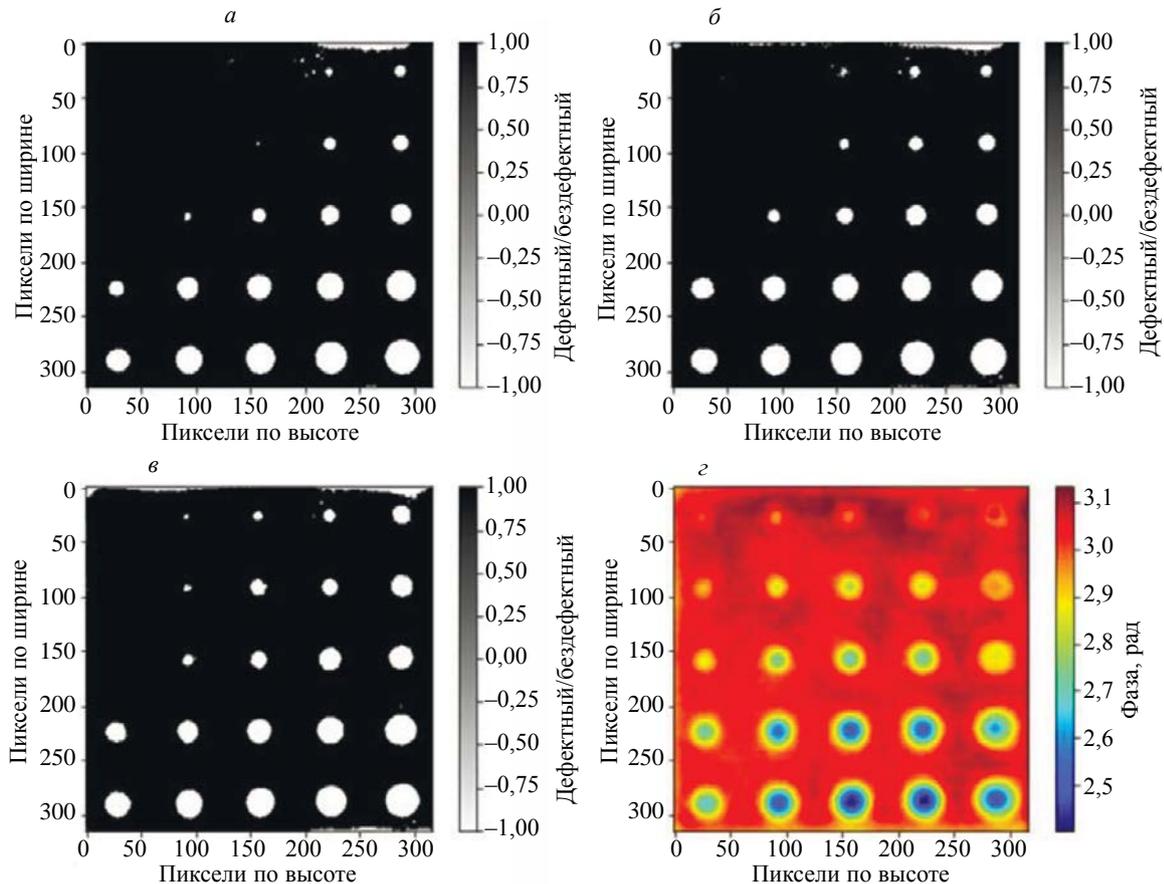


Рис. 9. Контроль дефектов в образце ПАУВ с использованием ОМОВ (а); ИЛ (б); ЛКВ (в) и оптимальная экспериментальная фазограмма для сравнения (г).

Как уже отмечалось ранее, МОА в зависимости от соответствующей процедуры генерируют для заданных данных коэффициент выброса, а по фактору загрязнения определяют пороговое

Таблица 1

Сравнение эффективности различных МОА в целях контроля дефектов в образце ПАУВ с оптимальными параметрами инициализации

Метод/Метрика		ОМОВ	ИЛ	ЛКВ
Время обучения, с		0,14	1,98	2,21
Время тестирования, с		20,46	27,29	192,1
Аккуратность тестирования, %		96,6	96,33	95,56
Точность	С дефектом	0,71	0,66	0,63
	Без дефекта	0,98	0,98	0,99
Полнота	С дефектом	0,74	0,83	0,83
	Без дефекта	0,98	0,97	0,97
F-мера	С дефектом	0,73	0,73	0,71
	Без дефекта	0,98	0,98	0,98

значение для классификации нормальных и аномальных участков [19—23]. Коэффициент выброса для заданных тестовых данных получается в виде одномерного вектора и далее преобразуется в реальный размер термограммы и представлен на рис. 10. По сравнению с картами дефектов карты коэффициент выбросов позволяют идентифицировать изменения параметров дефектов, таких как размер и глубина, что аналогично преимуществам традиционных методов обработки [3]. На основании первичных наблюдений можно сказать, что значения коэффициента выбросов положительны или больше нуля для тепловых профилей бездефектных областей, а в зависимости от размера и глубины дефектов они становятся отрицательными и еще больше уменьшаются. Самые мелкие и крупные дефекты имеют наименьшие значения коэффициента выброса и становятся близкими к нулю или положительными при уменьшении размера дефекта и увеличении его глубины.

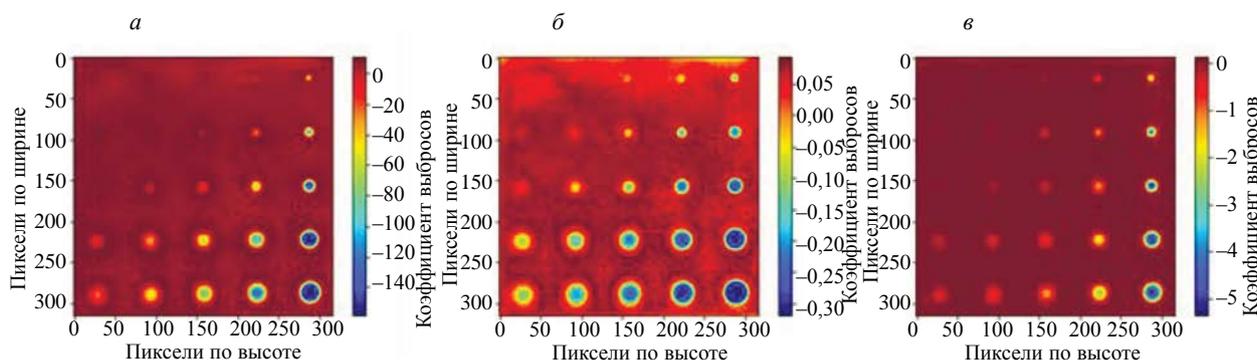


Рис. 10. Карты коэффициентов выброса для образца из ПАУВ CFRP-S15, полученные с помощью ОМОВ (а); ИЛ (б); ЛКВ (в).

В дальнейшем преимущество коэффициента выбросов используется для вычисления отношения сигнал/шум дефекта (ОСШ). Здесь используется обычная методика расчета ОСШ, при которой берется логарифм отношения разности средних значений дефектной и бездефектной областей к стандартному отклонению бездефектной области, как показано в формуле:

$$ОСШ = 20 \log \left(\frac{\text{среднее дефектной области} - \text{среднее бездефектной области}}{\text{стандартное отклонение бездефектной области}} \right) \quad (2)$$

Совместный анализ ВОД для дефектов, выявленных на рис. 9, и ОСШ, рассчитанные для дефектов на рис. 10, показаны на рис. 11а и б соответственно. Соотношение сторон каждого дефекта для справки представлено на рис. 2в. Значения ВОД остаются нулевыми для неидентифицированных дефектов.

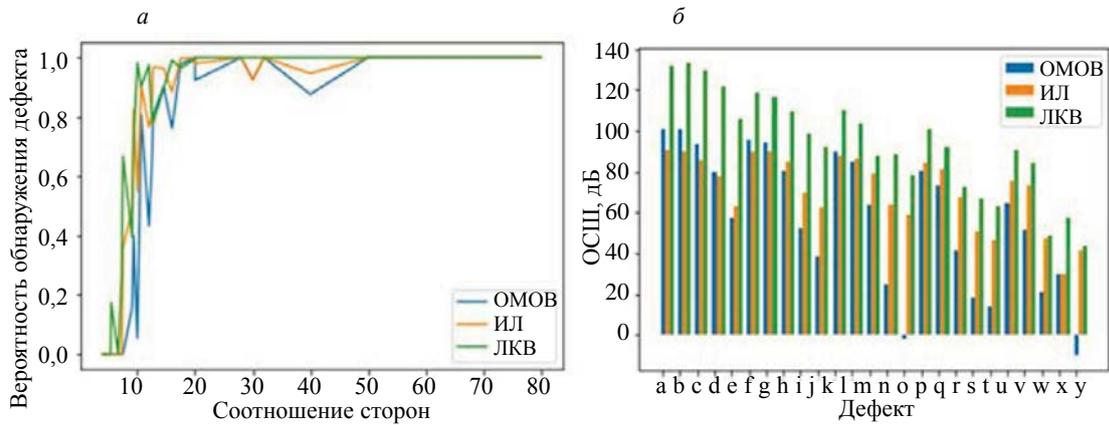


Рис. 11. Вероятность обнаружения дефекта (а) и ОСШ для дефектов (б).

фицированных дефектов (малые размеры и более глубокие дефекты) для каждой МОА, а дефекты с большими размерами (высокое соотношение геометрических параметров) идентифицируются точно и имеют наибольшую ВОД. А для всех дефектов с меньшим отношением сторон ВОД колеблется ниже допустимого предела 0,75 [9]. Однако ИЛ и ЛКВ демонстрируют близкие к допустимому пределу значения ВОД для нескольких дефектов и преодолевают порог для дефектов с отношением сторон более 10. Что касается ОСШ, то можно заметить, что ЛКВ демонстрирует высокий уровень ОСШ для всех дефектов по сравнению с другими МОА. Это объясняется меньшими вариациями коэффициентов выбросов в бездефектной области, что приводит к очень малому стандартному отклонению. Кроме того, неравномерность в левом верхнем углу карты коэффициентов выбросов ИЛ снижает ОСШ для более глубоких и мелких дефектов. Поскольку карты коэффициентов выбросов похожи на результаты способов обработки, зависимость глубины и размера дефекта от коэффициента выбросов представлена на рис. 10 и дополнительно анализируется.

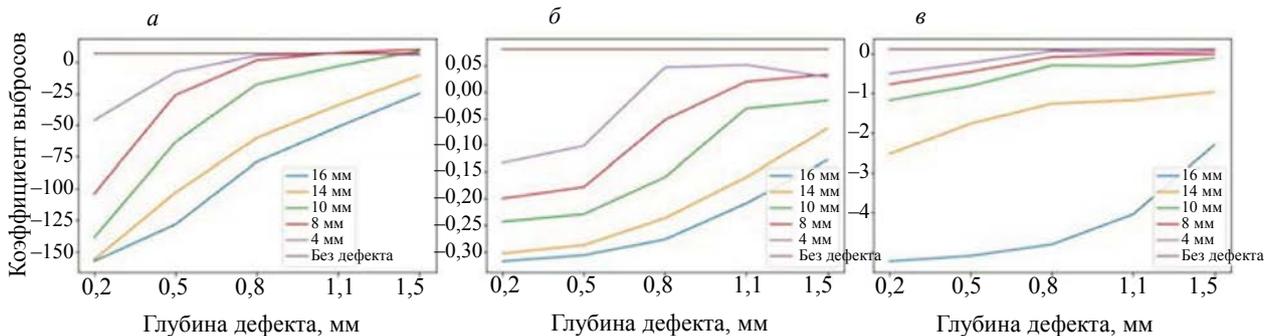


Рис. 12. Зависимость между глубиной/размером дефекта и коэффициентом выбросов для дефектов в образце CFRP-S15, взятого из ОМОВ (а); ИЛ (б); ЛКВ (в).

Коэффициент выброса берется в центральном пикселе для всех дефектов и откладывается в зависимости от глубины для каждого размера. В отличие от вариаций параметров традиционных методов обработки [18, 19], коэффициент выброса представляет собой гибридную характеристику для вариаций глубины и размера. Из ОМОВ и ИЛ на рис. 10а и б видно, что для дефектов больших размеров наблюдается линейная тенденция изменения коэффициента выброса по мере увеличения глубины, а для остальных дефектов — нелинейная. С другой стороны, коэффициент выброса, выраженный в форме ЛКВ, практически повторяет линейную тенденцию для всех размеров дефектов по мере увеличения их глубины. Эти особенности могут способствовать количественной оценке параметров дефектов аналогично традиционным методам обработки [13, 14].

Кроме вышеуказанного образца, с помощью МОА исследован образец из стеклопластика с искусственными тефлоновыми включениями различной формы. Схема расположения включений в образце, опорные данные и выбор обучающих данных представлены на рис. 13 *а* и *б*. Процедуры подготовки образцов и проведения экспериментов, этапы извлечения данных, предварительной обработки и задания опорных данных такие же, как и для вышеуказанных примеров. После линейной аппроксимации и удаления средних значений эффективный тепловой отклик образца ПАУВ представлен в виде куба термограмм из 625 кадров с разрешением 73×154 пикселя каждый. В ходе тщательного сопоставления тепловых данных с бинарной истиной выяснилось, что из 11242 пиксельных профилей только 376 пиксельных профилей относятся к областям дефектов, а остальные 10866 профилей покрывают бездефектную область. Поскольку МОА должны обучаться индивидуально на соответствующих тепловых данных образца [18], случайным образом выбираются 100 тепловых профилей из бездефектной области, как показано на рис. 13*б*. Далее, параметры обучения МОА для образца ПАУВ выбирались следующим образом: коэффициент загрязнения — 0,1, параметр ядра ОМОВ — 0,001, случайный инициализатор — 42 для ИЛ и MinPts — 20 для ЛКВ.

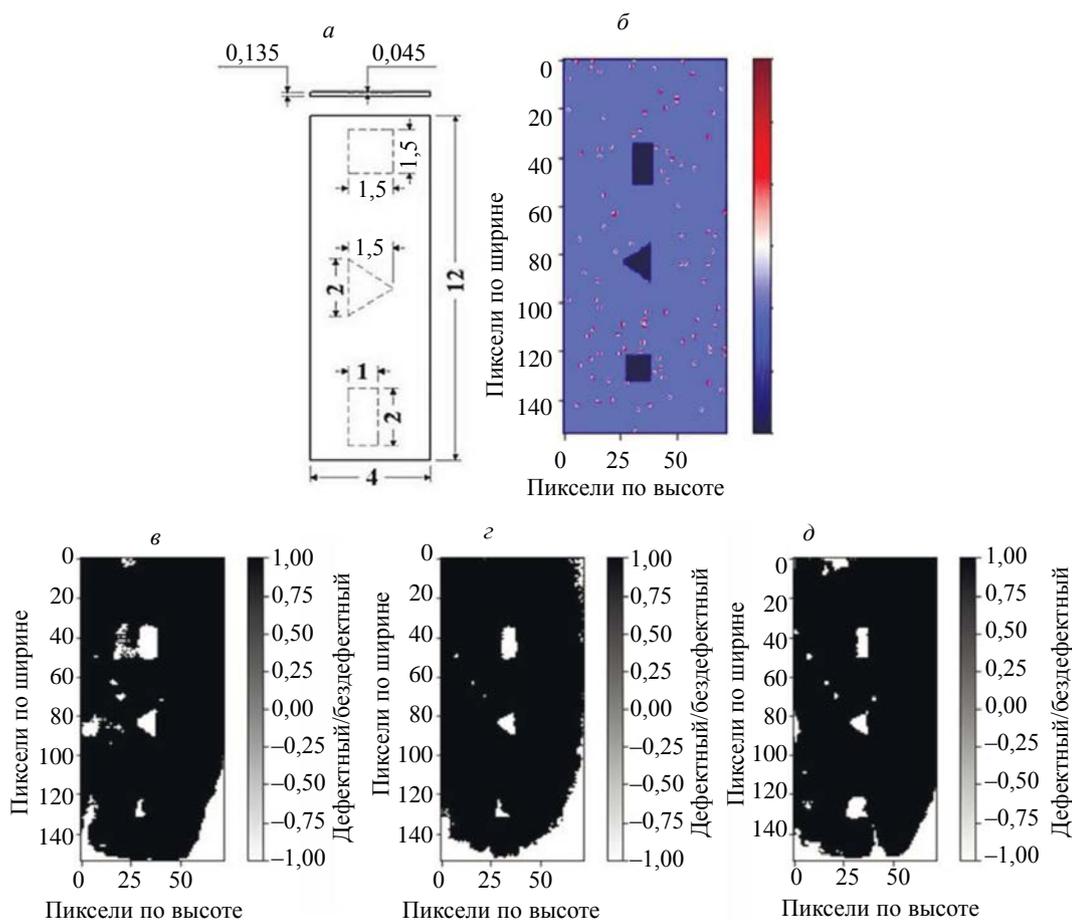


Рис. 13. Схема расположения включений в образце (*а*); выбор данных для обучения (*б*), обнаружение дефектов с использованием: ОМОВ (*в*), ИЛ (*г*) и ЛКВ-образца ПАУВ (*д*).

Аналогичные наблюдения получены и для образца ПАУВ, где ОМОВ имеет больше ошибок в классификации, чем другие МОА, а ЛКВ обнаруживает все дефекты с лучшей идентификацией и меньшим количеством ошибок классификации, чем ОМОВ и ИЛ, как показано на рис. 13*в—д*. Время обучения, время тестирования и другие качественные показатели представлены в табл. 2, где лучшие значения выделены жирным шрифтом, где МОА потребляет очень мало времени на обучение, тестирование и дает лучшие результаты при обнаружении дефектов. Наконец, сравнение данной МОА с нашей предыдущей моделью глубокого обучения с учителем в [15] проводится для

Сравнение эффективности различных МОА для образца ПАУВ

Метод/Метрика		ОМОВ	ИЛ	ЛКВ
Время обучения, с		0,02	0,5	0,08
Время тестирования, с		0,18	2,95	1,72
Аккуратность тестирования, %		91,02	88,51	92,14
Точность	С дефектом	0,21	0,15	0,24
	Без дефекта	0,99	0,98	0,99
Полнота	С дефектом	0,63	0,52	0,6
	Без дефекта	0,92	0,9	0,93
F-мера	С дефектом	0,32	0,23	0,34
	Без дефекта	0,95	0,94	0,96

образцов полимеров, армированных в одном случае углеволокном, а в другом — стекловолокном. Первые модели обучались на тепловом отклике углепластикового образца и, следовательно, обеспечивали лучшую детализацию дефектов. С другой стороны, в данном случае имеет место дисбаланс классов, поэтому трансферное обучение дало неудовлетворительные результаты. Однако способность МОА обучаться на небольшом количестве примеров нормальных классов позволила превзойти модели глубокого обучения с учителем и выявить дефекты, как показано на рис. 13.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании подчеркивается преимущество обучения на небольшом количестве примеров данных положительного или нормального класса для обучения МОА на простом обнаружении по сравнению со сложными моделями обучения с учителем для обнаружения дефектов. МОА обучаются на небольшом количестве тепловых профилей из области без дефектов, и их эффективность проверяется для различных комбинаций параметров инициализации. Количество обнаруженных дефектов, метрики эффективности и анализ надежности позволяют сделать вывод об оптимальном выборе параметров инициализации. В результате проведенных наблюдений можно сделать вывод, что МОА являются лучшей альтернативой моделям обучения с учителем для автоматического обнаружения дефектов, и при необходимости выявления всех дефектов можно ограничиться аккуратностью и другими показателями. Пользователь может выбрать оптимальные параметры инициализации в зависимости от требований к количеству выявляемых дефектов и точности их обнаружения.

Сокращения:

НК	Неразрушающий контроль
ТНК	Тепловой неразрушающий контроль
КЧМТВ	Квадратичная частотно-модулированная тепловая волна
МО	Машинное обучение
ГО	Глубокое обучение
СНС	Сверточная нейронная сеть
ДКП	Долгая краткосрочная память
Р-СНС	Региональная сверточная нейронная сеть
YOLO	You only look once («Стоит только раз взглянуть»)
МОА	Модели обнаружения аномалий
ПАУВ	Полимер, армированный углеволокном
ОМОВ	Одноклассовый метод опорных векторов
ИЛ	Изолированный лес
ЛКВ	Локальный коэффициент выбросов
ИП	Истинно положительный
ИО	Истинно отрицательный
ЛП	Ложноположительный
ЛО	Ложноотрицательный
ВОД	Вероятность обнаружения дефекта
ОСШ	Отношение сигнал/шум

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aldrin C. John. Intelligence augmentation and Human Machine Interface (HMI) best practices for NDT 4.0 reliability / In ASNT Annual Conference, Westgate Las Vegas Resort & Casino, Wsetgs Las Vegas, Nevada. 2019.
2. Maldague X.P.V. Theory and Practice of Infrared Technology for Non-Destructive Testing. New York: Wiley, 2001.
3. Ciampa Francesco, Mahmoodi Pooya, Pinto Fulvio, Meo Michele. Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components // Sensors 18. 2018. No. 2. P. 609.
4. He Yunze, Deng Baoyuan, Wang Hongjin, Cheng Liang, Zhou Ke, Cai Siyuan, Ciampa Francesco. Infrared machine vision and infrared thermography with deep learning: A review // Infrared Physics & Technology. 2021. V. 116. P. 103754.
5. Luo Q, Gao B, Woo WL, Yang Y. Temporal and spatial deep learning network for infrared thermal defect detection // NDT & E International. 2019. V. 108. P. 102164.
6. Hu Bozhen, Gao Bin, Lok Woo Wai, Ruan Lingfeng, Jin Jikun, Yang Yang, Yu Yongjie. A lightweight spatial and temporal multi-feature fusion network for defect detection // IEEE Transactions on Image Processing. 2020. V. 30. P. 472—486.
7. Saeed Numan, King Nelson, Said Zafar, Omar Mohammed A. Automatic defects detection in CFRP thermograms, using convolutional neural networks and transfer learning // Infrared Physics & Technology. 2019. V. 102. P. 103048.
8. Wei Ziang, Fernandes Henrique, Herrmann Hans-Georg, Tarpani Jose Ricardo, Osman Ahmad. A deep learning method for the impact damage segmentation of curve-shaped cfrp specimens inspected by infrared thermography // Sensors 21. 2021. No. 2. P. 395.
9. Fang Qiang, Ibarra-Castanedo Clemente, Maldague Xavier. Automatic defects segmentation and identification by deep learning algorithm with pulsed thermography: Synthetic and experimental data // Big Data and Cognitive Computing 5. 2021. No. 1. P. 9.
10. Wei Ziang, Fernandes Henrique, Tarpani Jose Ricardo, Osman Ahmad, Maldague Xavier. Stacked denoising autoencoder for infrared thermography image enhancement / In 2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), IEEE, 2021. P. 1—7.
11. Cheng Liangliang, Kersemans Mathias. Dual-IRT-GAN: A defect-aware deep adversarial network to perform super-resolution tasks in infrared thermographic inspection // Composites Part B: Engineering. 2022. P. 110309.
12. Tretout H., David D., Marin J. Y., Dessendre M., Couet M., Avenas-Payan I. An evaluation of artificial neural networks applied to infrared thermography inspection of composite aerospace structures // NDT and E International 6. 1996. No. 29. P. 392.
13. Lakshmi A. Vijaya, Gopi tilak V., Parvez Muzammil M., Subhani S.K., Ghali V.S. Artificial neural networks based quantitative evaluation of subsurface anomalies in quadratic frequency modulated thermal wave imaging // Infrared Physics and Technology 97. 2019. P. 108—115.
14. Lakshmi A. Vijaya, Ghali V.S., Subhani Sk., Balaji Naik R. Automated quantitative subsurface evaluation of fiber reinforced polymers // Infrared Physics & Technology 110. 2020. P. 103456.
15. Vesala G.T., Ghali V.S., Lakshmi A. Vijaya, Naik R.B. Deep and handcrafted feature fusion for automatic defect detection in quadratic frequency modulated thermal wave imaging // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 6. P. 476—485.
16. Liu Lishuai, Guo Chenjun, Xiang Yanxun, Tu Yanxin, Wang Liming, Xuan Fu-Zhen. A semisupervised learning framework for recognition and classification of defects in transient thermography detection // IEEE Transactions on Industrial Informatics 18. 2021. No. 4. P. 2632—2640.
17. Morelli Davide, Marani Roberto, D'Accardi Ester, Palumbo Davide, Galietti Umberto, D'Orazio Tiziana. A Convolution Residual Network for Heating-Invariant Defect Segmentation in Composite Materials Inspected by Lock-in Thermography // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021. V. 70. P 1—14.
18. Tilak V. Gopi, Ghali V. S., Lakshmi A. Vijaya, Suresh B., Naik R. B. Proximity based automatic defect detection in quadratic frequency modulated thermal wave imaging // Infrared Physics & Technology. 2021. V. 114. P. 103674.
19. Vesala G.T., Ghali V.S., Sastry DVA Rama, Naik R.B. Deep anomaly detection model for composite inspection in quadratic frequency modulated thermal wave imaging // NDT & E International. 2022. V. 132. P. 102710.
20. Munir Mohsin, Chattha Muhammad Ali, Dengel Andreas, Ahmed Sheraz. A Comparative Analysis of Traditional and Deep Learning-based Anomaly Detection Methods for Streaming Data / In 2019 18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA). IEEE, 2019. P. 561—566.
21. Schölkopf Bernhard, Platt John C., Shawe-Taylor John, Smola Alex J., Williamson Robert C. Estimating the support of a high-dimensional distribution // Neural computation. 2001. V. 13. No. 7. P. 1443—1471.
22. Liu Fei Tony, Ting Kai Ming, Zhou Zhi-Hua. Isolation forest / In 2008 eighth IEEE international conference on data mining. IEEE, 2008. P. 413—422.
23. Breunig Markus M., Kriegel Hans-Peter, Ng Raymond T., Sander Jörg. LOF: identifying density-based local outliers / In Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data. 2000. P. 93—104.

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ АВИАЦИОННЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЯХ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

© 2023 г. А.О. Чулков^{1,*}, Б.И. Шагдыров¹, В.П. Вавилов¹, Д.Ю. Кладов¹, В.И. Стасевский¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634050 Томск, пр-кт Ленина, 30
*E-mail: chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 22.09.2023; после доработки 05.10.2023
Принята к публикации 06.10.2023

Описаны результаты применения автоматизированного алгоритма обнаружения воды в горизонтально ориентированных сотовых авиационных панелях и определения массы воды по результатам активного теплового контроля (ТК). В отличие от ультразвукового метода, ТК позволяет обнаруживать воду и оценивать ее количество при наличии воздушного зазора между водой и контролируемой обшивкой. Разработанный на базе искусственной нейронной сети алгоритм обеспечил оценку количества воды в ячейках сот с погрешностью до 15 % как в случае примыкания воды к обшивке, так и при наличии воздушного зазора.

Ключевые слова: тепловой неразрушающий контроль, сотовая панель, вода в сотах, искусственная нейронная сеть.

DETECTING AND EVALUATING WATER INGRESS IN HORIZONTALLY ORIENTED AVIATION HONEYCOMB PANELS BY USING AUTOMATED THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING

A.O. Chulkov^{1,*}, B.I. Shagdyrov¹, V.P. Vavilov¹, D.Yu. Kladoy¹, V.I. Stasevskiy¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634050 Tomsk, Lenin Av., 30
*E-mail: chulkovao@tpu.ru

Results of applying active thermal nondestructive testing for the detection of water ingress in horizontally oriented aviation honeycomb panels and quantitative evaluation of water content are presented. Unlike ultrasonic inspection, thermal testing allows detecting water and evaluating its quantity in the presence of air gaps between water and inspected honeycomb skin. The proposed algorithm based on using an artificial neural network has enabled estimating water content with errors under 15 % in the cases where water contacts with a honeycomb skin, as well as in presence of air gaps between skin and water.

Keywords: thermal nondestructive testing, honeycomb panel, water ingress, artificial neural network.

DOI: 10.31857/S0130308223120035, EDN: XIEKEM

ВВЕДЕНИЕ

Сотовые конструкции появились в авиации в начале 20-го века [1] и широко используются в настоящее время благодаря их высокой жесткости и прочности при относительно малой массе. Несмотря на развитые технологии производства сотовых панелей на основе алюминия, а также панелей, включающих вошеную бумагу и полимерные композиты, сотовые конструкции могут содержать производственные и эксплуатационные дефекты. К производственным дефектам относятся отслоения обшивки от сотового наполнителя, смятие наполнителя, заполнение сот связующим (эпоксидной смолой), непрочности вокруг технологических вставок и т.д. Такие дефекты могут возникать также в процессе эксплуатации авиационной техники, однако специфическим эксплуатационным дефектом является вода в ячейках сот, которая в процессе замерзания/размерзания может приводить к катастрофическому разрушению элементов планера. Все вышеуказанные дефекты могут быть выявлены с помощью теплового неразрушающего контроля (НК). Следует отметить, что традиционно применяемый ультразвуковой метод НК неэффективен для контроля дефектов сотовых панелей, что связано с малой толщиной обшивки сот, а также различной ориентацией воды в ячейках сот, в особенности при наличии воздушного зазора между водой и контролируемой поверхностью [2—5].

Тепловой НК может быть использован для определения воды без использования дополнительного источника нагрева [6]. Участки сотовых панелей, содержащие воду, характеризуются



Рис. 1. Пассивная диагностика влагосодержания в руле направления самолета Boeing-737 после посадки с помощью тепловизионного модуля ThermApp (обследование НИ ТПУ в 2018 г., аэропорт г. Томска [6]).

высокой тепловой инерцией и, следовательно, аномальной температурой в ходе нестационарных тепловых процессов, сопровождающих посадку самолета (см. иллюстрацию на рис.1). Соответствующая методика была разработана в НИ ТПУ и передана в ГосНИИ ГА, где используется в настоящее время. Более поздние исследования показали, что, анализируя время восстановления температуры дефектных зон после посадки самолета, можно приблизительно определить количество воды в ячейках сот [6].

Применение активного теплового контроля (ТК) позволяет оценить количество воды в ячейках сот с меньшей погрешностью по сравнению с пассивной инспекцией, однако требует больших трудозатрат [4—6]. Пассивная тепловизионная диагностика воды основана на оценке площади, занимаемой водой, и возможна в течение определенного интервала времени после посадки самолета. Следует отметить, что пространственная ориентация сотовых панелей в планере может иметь большое количество вариантов, что приводит к различному распределению воды в частично заполненных ячейках сот. Опираясь на практический опыт контроля воды в эксплуатируемых самолетах, установлено, что под действием силы гравитации вода в сотовых панелях перемещается вниз, поэтому в вертикально расположенных сотовых панелях нижние ячейки сот обычно заполнены целиком.

Для повышения производительности ТК авиационных сотовых конструкций и монолитных композиционных панелях в НИ ТПУ был разработан ряд тепловизионных дефектоскопов [7], в том числе роботизированного и сканирующего типов, которые обеспечивают производительность НК до $25 \text{ м}^2/\text{ч}$. Тем не менее процедуры обработки результатов ТК остаются трудоемкими. Кроме того, интерпретация данных зависит от квалификации оператора-термографиста, поэтому актуальна разработка автоматизированных тепловых дефектоскопов и специализированных алгоритмов анализа результатов НК.

Для реализации таких алгоритмов в НК применяют искусственные нейронные сети (НС). В частности, разработанные в НИ ТПУ программные алгоритмы на базе НС эффективно позволяют выявлять расслоения в теплозащитных покрытиях и монолитных композиционных материалах, а также определять глубину их залегания в автоматизированном режиме [8].

В настоящей статье описан способ автоматизированного выявления и количественной оценки воды в горизонтально ориентированных композитных сотовых панелях при использовании односторонней процедуры активного ТК и обработки данных с помощью искусственной НС.

2. КОНТРОЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ

Для разработки и экспериментальной апробации алгоритма оценки количества воды в авиационных сотовых панелях был изготовлен контрольный образец панели размерами 160×160×10 мм (рис. 2). Несколько групп ячеек сот были заполнены водой в различном количестве. Поскольку стеклопластиковая обшивка сот толщиной 1 мм частично прозрачна для оптического излучения нагрева, контролируемая поверхность была окрашена черной матовой краской с коэффициентом излучения/поглощения 0,96.

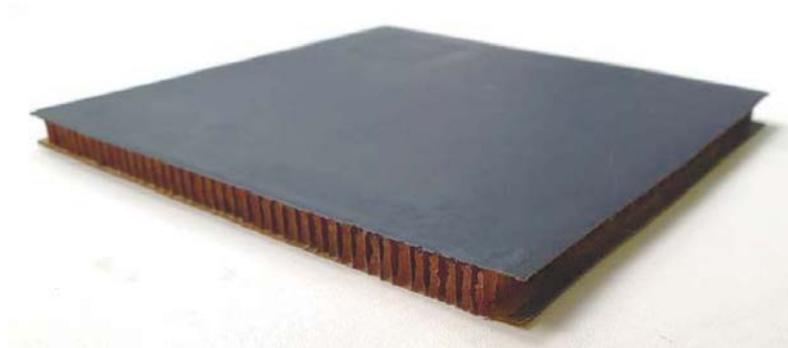


Рис. 2. Контрольный образец сотовой панели с обшивкой из стеклопластика и сотовым наполнителем из вощеной бумаги.

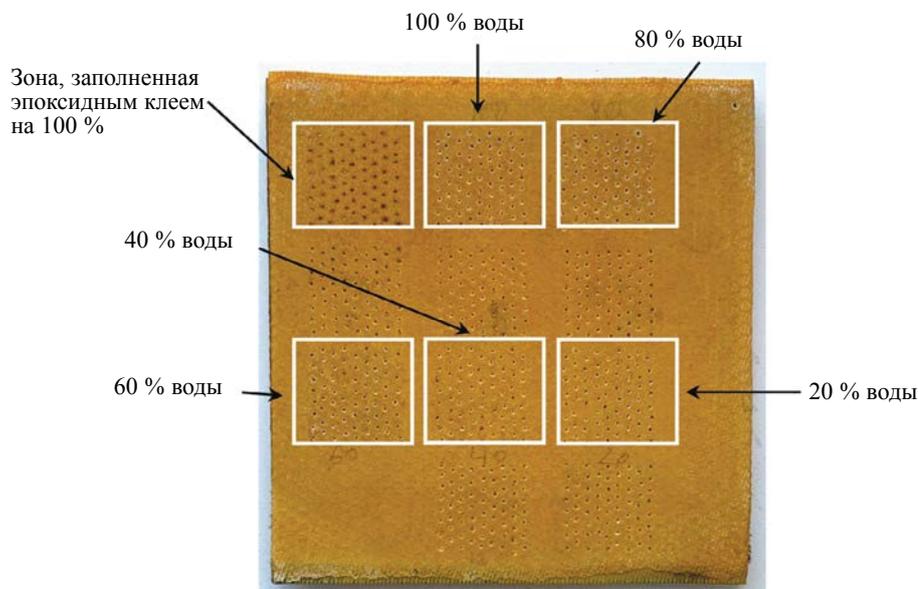


Рис. 3. Обратная поверхность контрольного образца с дефектными зонами.

На обратной стороне сотовой панели в обшивке были проделаны отверстия, через которые в ячейки сот вводили воду. Всего было выделено шесть зон, каждая из которых включала 72 ячейки; 5 зон были заполнены водой на 20, 40, 60, 80 и 100 %, а одна зона была заполнена на 100 % эпоксидной смолой, что имитировало соответствующий производственный дефект. Воду и эпоксидную смолу вводили с помощью шприца в каждую ячейку отдельно. Обратная поверхность образца показана на рис. 3. После наполнения ячеек сот отверстия на задней поверхности образца были закрыты клейкой лентой.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сотовую панель контролировали в односторонней процедуре ТК со стороны поверхности, окрашенной в черный цвет. Применили 2 схемы контроля: 1) «снизу», когда вода находилась в контакте с обшивкой; 2) «сверху», когда вода в соответствующих зонах не касалась внутренней поверхности обшивки (контроль через воздух). Перед контролем по второй схеме образец выдерживали 12 ч для того, чтобы вода опустилась на дно ячеек сот. Следует заметить, что реальное распределение воды в ячейках, например, заполненных водой на 20 %, могло отличаться от ожидаемого за счет действия сил поверхностного натяжения.

Экспериментальная установка показана на рис. 4. Для нагрева использовали тепловой дефектоскоп с оптическим нагревателем мощностью 1 кВт. Одновременно с нагревом выполняли регистрацию термограмм с частотой 10 Гц с помощью тепловизионного модуля FLIR A325 SC.

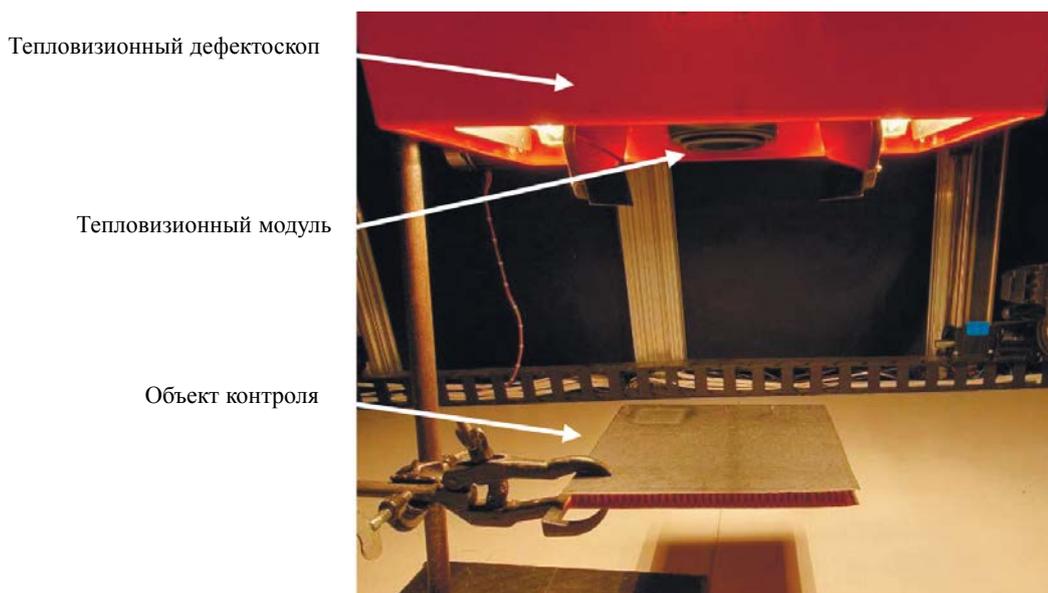


Рис. 4. Тепловой контроль воды в сотах по схеме «сверху».

На рис. 5а приведена термограмма, полученная при контроле образца по схеме «снизу». Квадратами выделены зоны, для которых на рис. 5б приведены графики изменения средней температуры. На рис. 5в в увеличении показан участок графиков рис. 5б, в котором видно различие профилей температуры для зон с различным количеством воды. Температурные различия между зонами с различным содержанием воды обусловлены различной тепловой инерцией этих зон и сохраняются в течение значительного времени на пологих участках соответствующих температурных профилей. Заметим, что для областей с содержанием воды 60, 80 и 100 % температуры были близки, испытывая определенное насыщение.

На рис. 6 приведены результаты ТК по схеме «сверху». Различия температурных профилей в этом случае оказались близкими к наблюдавшимся при контроле «снизу», несмотря на наличие воздушных зазоров. Это объясняется тем, что при длительных временах наблюдения пологие участки температурных профилей поверхностных температур определяются тепловой инерцией ячеек в целом, т.е. включая воду через воздушный зазор. Заметим, что при малых временах наблюдения (см. участки резкого спада температуры на рис. 5б и 6б) поведение температурных кривых определяется теплофизическими свойствами и толщиной обшивки, а также толщиной воды, прилегающей к обшивке.

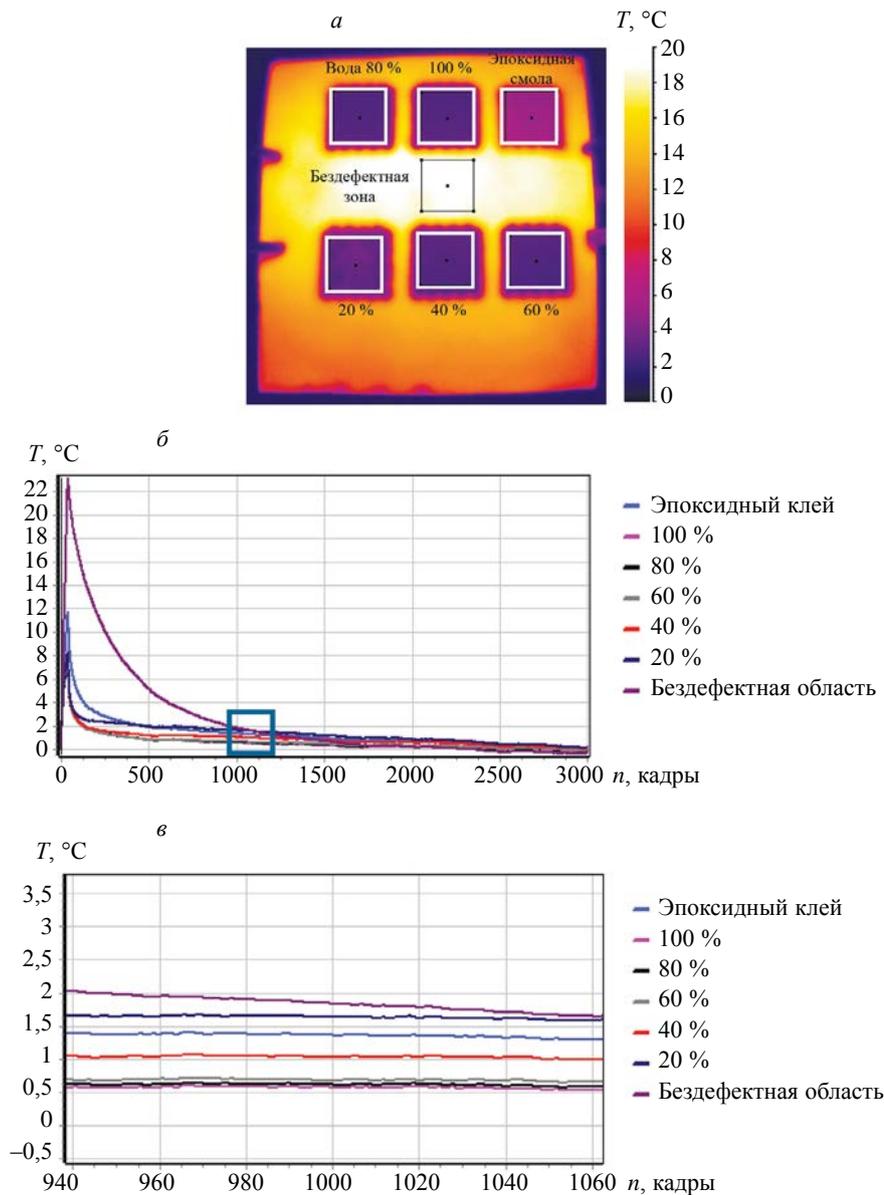


Рис. 5. Результаты ТК воды в контрольной сотовой панели по схеме «снизу»: термограмма на 10-й секунде контроля (а); графики изменения средних температур в дефектных зонах (б); графики температуры в зоне, выделенной на рис. 5б, (в).

4. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ

Для автоматизированного определения количества воды в ячейках сот был использован программный модуль THERMO_NN (НИ ТПУ) [9]. Обучение искусственной НС проводили с использованием алгоритма наименьшей среднеквадратичной ошибки. Согласно ранее предложенной методике, перед применением алгоритмов дефектометрии на базе искусственных НС целесообразна обработка данных методом термографической реконструкции сигнала (Thermographic Signal Reconstruction — TSR). Такой подход позволяет «разделить» используемые для обучения данные, что обеспечивает низкий процент ошибок при применении обученной НС на конкретной серии экспериментов. Недостатком подхода является ориентация искусственных НС на распознавание преимущественно однотипных данных. Иными словами, даже небольшие изменения условий проведения эксперимента приводят к существенным ошибкам в результатах автоматизированной обработки данных. В рамках предлагаемого алгоритма в качестве предварительной обработки результатов ТК применено простое вычитание первого (фонового) кадра, что позволило подчер-

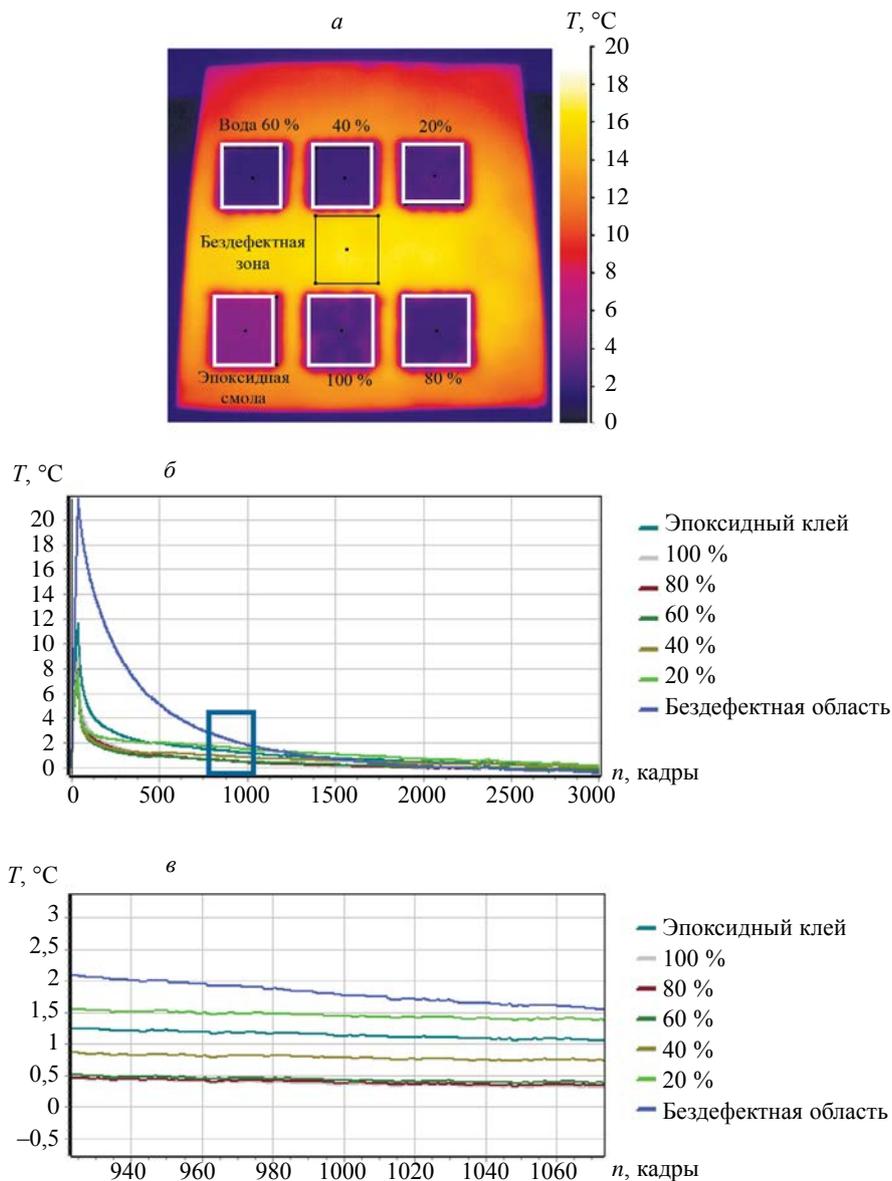


Рис. 6. Результаты ТК воды в контрольной сотовой панели по схеме «сверху» (через воздух): термограмма на 10-й секунде контроля (а); графики изменения средних температур в дефектных зонах (б); графики температуры в зоне, выделенной на рис. 6б, (в).

кнуть различия температурных профилей в зонах с различным содержанием воды при ТК по схемам как «снизу», так и «сверху» (см. рис. 5в и 6в).

Данные для обучения искусственной НС были получены в зонах, расположенных по углам и в центральных точках отдельных дефектных отметок (см. рис. 7а и 7в) путем анализа последовательностей термограмм, полученных при контроле воды по схемам «снизу» и «сверху». Таким образом, при обучении НС в каждой дефектной отметке были использованы данные из пяти различных зон с 400—450 пикселями в каждой. Соответственно, для каждой дефектной отметки количество кривых, участвующих в обучении, составляло около 2200, что при 3000 точек в каждой кривой по времени обеспечивало 6 600 000 значений, которые были использованы для обучения искусственной НС с целью определения параметров одной дефектной отметки. Целями обучения являлось количество воды, причем для ячеек, заполненных водой на 100 %, соответствующей целью являлось значение 1, для 20 % — 0,2 и т.д. Для зоны с ячейками, заполненными эпоксидной смолой, целью обучения было значение 1,2.

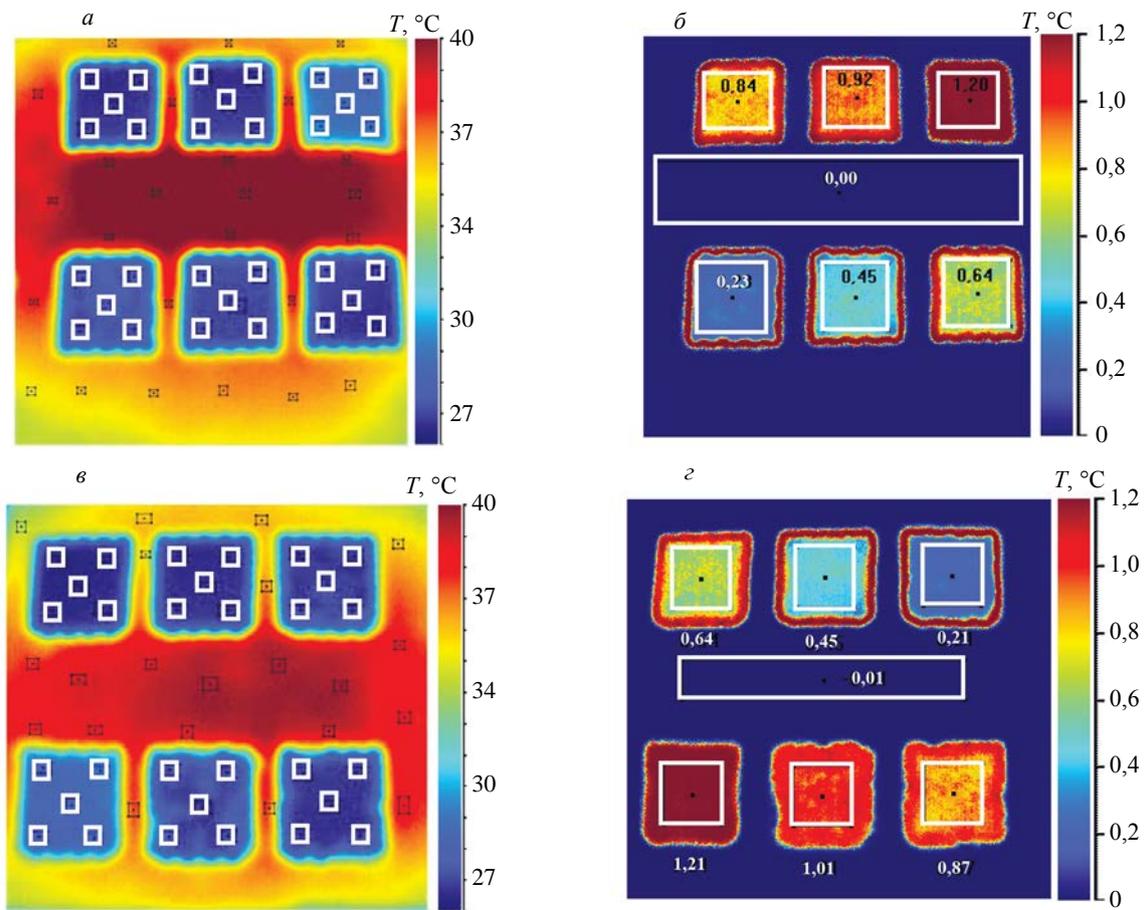


Рис. 7. Результаты автоматизированного определения содержания воды в сотовых панелях: термограмма на 10-й секунде контроля, показаны зоны, использованные для обучения НС (схема контроля «снизу») (а); карта содержания воды (контроль «снизу») (б); термограмма на 10-й секунде контроля, показаны зоны, использованные для обучения НС (схема контроля «сверху») (в); карта содержания воды (контроль «сверху») (г).

На рис. 7б и 7г приведены карты дефектов, полученные с помощью искусственной НС. Цвет каждой из дефектных зон, а также бездефектной зоны, соответствует количеству воды согласно приведенной шкале (в принятых условных единицах).

Таблица 1

Результаты автоматизированного определения количества воды в сотовой панели

Истинное наполнение	Оценка наполнения ячеек сот						Бездефектные зоны
	Эпоксидная смола 100 %	Вода, %					
		100	80	60	40	20	
НС	1,2	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
Контроль по схеме «снизу» (вода в контакте с внутренней стороной обшивки)							
Оценка цели по экспериментальным данным	1,20	0,92	0,84	0,64	0,45	0,23	0
Величина ошибки, %	0	8	5	7	13	15	0
Контроль по схеме «сверху» (вода не контактирует с внутренней стороной обшивки)							
Оценка цели по экспериментальным данным	1,21	1,01	0,87	0,64	0,45	0,21	0,01
Величина ошибки, %	1	1	9	7	13	5	0

В табл. 1 приведены ошибки определения количества воды в сотах при различных схемах ТК. Видно, что наибольшая погрешность (13 и 15 %) относится к участкам панели, заполненным

водой на 40 и 20 % в схеме контроля «снизу». Для схемы испытаний «сверху» наибольшая величина ошибки составила 13 и 9 % для участков с заполнением водой на 40 и 80 %.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активный ТК целесообразен для выявления дефектов в сотовых панелях благодаря высокой производительности испытаний и возможности идентификации характерных видов дефектов. Проведенные ранее исследования продемонстрировали ошибку определения количества воды при полном заполнении сот на уровне около 10 % от объема сот. Результаты настоящих исследований подтверждают возможность автоматизированного определения количества воды в сотах с помощью алгоритма, работающего на базе искусственной НС, включая ситуации, где между водой и обшивкой имеется воздушный зазор, и, следовательно, применение контактного ультразвукового контроля неэффективно. При этом величина ошибки оценки влагосодержания (по крайней мере в лабораторных условиях) не превысила 15 %, что приемлемо с практической точки зрения. Предложенная процедура активного ТК может быть реализована в условиях лаборатории, ангара и предположительно на стоянке самолета в качестве дополнительной к пассивной диагностике. Применение разработанного алгоритма для определения количества воды при частичном заполнении ячеек вертикально расположенных панелей потребует дополнительного обучения искусственной НС и является предметом дальнейших исследований.

Настоящее исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда №22-29-01469.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.aviationunion.ru/media/news/25824>
2. *Ibarra-Castanedo C., Brault L., Genest M., Farley V., Maldague X.P.V.* Detection and characterization of water ingress in honeycomb structures by passive and active infrared thermography using a high resolution camera / Conference: 2012 Quantitative InfraRed Thermography. 2012. DOI: 10.21611/qirt.2012.278
3. *Чулков А.О., Gaverina L., Pradere C. Batsale J.-C., Вавилов В.П.* Обнаружение воды в сотовых композиционных конструкциях методом терагерцовой термографии // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 72—76.
4. *Вавилов В.П., Нестерук Д.А.* Способ тепловизионного контроля воды в сотовых панелях эксплуатируемых самолетов / Патент РФ № 2284515. 2005.
5. *Нестерук Д.А.* Тепловизионный контроль воды в авиационных сотовых панелях в процессе эксплуатации самолетов / Дисс. ... канд. техн. наук. Томск: Томский политехнический университет, 2005.
6. *Пань Янян.* Количественная оценка влагосодержания в композиционных сотовых панелях эксплуатируемых самолётов методом инфракрасной термографии / Дисс. ... канд. техн. наук. Томск: Томский политехнический университет, 2018.
7. <https://www.interfax-russia.ru/siberia/news/uchenye-tomskogo-politeha-usovershenstvovali-defektoskop-dlya-aviacii>
8. *Chulkov A.O., Vavilov V.P., Shagdyrov B.I., Klodov D.Yu.* Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography // Journal of Nondestructive Evaluation. 2023. V. 42 (1). DOI: 10.1007/s10921-023-00929-x
9. *Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ “THERMO_NN” №2020619186. 2020.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ МЕТОДОМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНТЕРВАЛОВ АГРЕГИРОВАНИЕМ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ

© 2023 г. С.В. Муравьев^{1,*}, Д.К. Нгуен^{1,**}

¹Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-кт Ленина, 30
E-mail: *muravyov@tpu.ru; **nguyen@tpu.ru

Поступила в редакцию 07.09.2023; после доработки 22.09.2023
Принята к публикации 22.09.2023

Проверка качества сварного шва обычно выполняется в ходе визуального контроля и значительно зависит от опыта оператора. В статье предложен подход к автоматическому обнаружению и классификации дефектной области, где сегментация анализируемого фотоизображения сварного шва (т.е. его разбиение на дефектную и бездефектную области) осуществляется с помощью процедуры наращивания областей. Начальные точки для этой процедуры выбираются предложенным авторами робастным методом комплексирования интервалов агрегированием предпочтений (IF&PA) на основе анализа гистограммы изображения. Проверка предложенного подхода на реальных фотоизображениях показала его способность обнаруживать разные типы дефектов сварного шва с более высокой точностью по сравнению с традиционными методами, такими как метод Оцу и метод *k*-средних.

Ключевые слова: обработка изображения, сегментация, гистограмма, уровень серого, дефектная область, сварной шов, комплексирование интервалов, агрегирование предпочтений.

AUTOMATIC SEGMENTATION BY THE METHOD OF INTERVAL FUSION WITH PREFERENCE AGGREGATION WHEN RECOGNIZING WELD DEFECTS

S.V. Muravyov^{1,*}, D.C. Nguyen^{1,**}

¹Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave., 30, Tomsk, 634050 Russia
E-mail: *muravyov@tpu.ru; **nguyen@tpu.ru

Quality control of welding is usually carried out during the visual inspection process and is highly dependent on an operator experience. In the paper, it is proposed an approach to automatic detection and classification of a defective region, where segmentation of the analyzed photographic image of a weld (i.e., its division into defective and defect-free regions) is performed using the region growing procedure. The starting points for this procedure are selected by the authors' robust method of interval fusion with preference aggregation (IF&PA) on the base of image histogram analysis. Testing of the proposed approach for real life photographic images showed its ability to detect different types of weld defects with higher accuracy compared to traditional methods such as Otsu method and *k*-means.

Keywords: image processing, segmentation, histogram, defect region, welding joint, interval fusion, preference aggregation.

DOI: 10.31857/S0130308223120047, EDN: XIFFYI

ВВЕДЕНИЕ

При автоматизации визуального контроля качества сварных швов [1—6] процесс распознавания дефектов может включать в себя несколько этапов (рис. 1). Входное изображение предварительно обрабатывается с целью уменьшения шумов. Затем выполняется основная операция обработки изображения — *сегментация* — для того, чтобы получить выходное изображение, разделенное на однородные области (дефектную и бездефектную) с известными границами. Каждая однородная область должна соответствовать реальному объекту на изображении. Процесс завершается отнесением дефектной области к одному из известных *классов* в соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 6520 [7].



Рис. 1. Процесс распознавания дефектов сварного шва.

Один из популярных методов сегментации, который будет использован в данной работе, — наращивание областей (region growing, НО) [8, 9] — включает каждый пиксель входного изображения в дефектную или бездефектную область, для чего выбираются *начальные точки-пиксели* (seeds) и к ним последовательно присоединяются соседние пиксели с ближайшим значением яркости тона.

От правильности выбора значения начальной точки зависит качество результата сегментации и итоговая точность всего процесса распознавания. При этом возможны два режима работы реализующего распознавание программного обеспечения (ПО):

1) интерактивный, когда осуществляющий визуальный контроль оператор отмечает (например, с помощью «мыши») на изображении определенные пиксели, значения яркости которых наилучшим, по его мнению, образом характеризуют ту или иную область;

2) автоматический, когда выбор подходящих пикселей осуществляется программным обеспечением без участия оператора.

В предыдущей публикации [2] авторами был предложен алгоритм автоматизированного распознавания дефектов сварных соединений (АРД). Целью данной статьи является обсуждение результатов исследований по дальнейшему развитию АРД, которые обеспечивают возможность реализации автоматической сегментации анализируемых изображений.

Интерактивный режим будет использоваться в ходе экспериментальных исследований предложенного алгоритма автоматического распознавания дефектов как способ получения заведомо правильных результатов распознавания.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНТЕРВАЛОВ АГРЕГИРОВАНИЕМ ПРЕДПОЧТЕНИЙ

Автоматический выбор начальных точек для метода НО предлагается осуществлять предложенным и развиваемым авторами методом комплексования интервалов агрегированием предпочтений (interval fusion with preference aggregation — IF&PA), см. статьи [10, 11]. Метод IF&PA позволяет находить для заданной выборки неравнозначных (т.е. имеющих разную дисперсию) значений $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ некоторой физической величины X оценку x^* центра ее распределения. Эта оценка, которую будем называть *результатом комплексования* x^* , характеризуется повышенными робастностью, точностью и достоверностью по сравнению с традиционными оценками, такими как среднее арифметическое, среднее взвешенное, выборочная медиана и др. [11]. Сформулируем кратко суть метода IF&PA.

Пусть имеется набор m замкнутых интервалов $\{I_k\}, k = 1, \dots, m$, на вещественной числовой оси, где каждый интервал характеризуется средней точкой x_k , нижней границей $x_k - \varepsilon_k$ и верхней границей $x_k + \varepsilon_k$, так что $I_k = [x_k - \varepsilon_k, x_k + \varepsilon_k]$; $x_k, \varepsilon_k \in \mathbf{R}$. Ключевая идея метода IF&PA состоит в преобразовании каждого из m исходных интервалов $\{I_k\}, k = 1, \dots, m$, в ранжирование принадлежащих этому интервалу n дискретных значений из множества $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \in \mathbf{R}$.

Ранжированием называется бинарное отношение предпочтения λ на множестве A в виде цепочки $\lambda = a_2 \succ a_1 \succ \dots \succ a_s \sim a_t \succ \dots \succ a_p \sim a_q$, где символы \succ и \sim обозначают бинарные отношения строгого порядка и толерантности соответственно. Заметим, что порядок предпочтения в ранжировании всегда ориентирован слева направо, т.е. более предпочтительные альтернативы находятся слева. Благодаря этому, для удобства и краткости обозначений, будем использовать очевидное компактное представление для ранжирования: $2, 1, \dots (s, t) \dots (p, q)$, в котором элементы обозначены их индексами, подмножества индексов толерантных элементов (классов эквивалентности) заключены в круглые скобки, а символы \succ и \sim опущены. Например, ранжирование $a_2 \succ a_5 \sim a_1 \succ a_3 \sim a_4 \succ a_6$ в краткой форме выглядит как $2(5,1)(3,4)6$.

Сформируем диапазон актуальных значений (ДАЗ) $A = \{a_1 < a_2 < \dots < a_n\}$ из принадлежащих интервалам строго упорядоченных дискретных значений $a_i, i = 1, \dots, n$, где $a_1 = \min \{x_k - \varepsilon_k | k = 1, \dots, m\}$ и $a_n = \max \{x_k + \varepsilon_k | k = 1, \dots, m\}$, а элемент $a_i = a_{i-1} + h, i = 2, \dots, n$, где норма $h = (a_n - a_1)/(n - 1)$ — это расстояние между любыми двумя соседними дискретными значениями.

Множество A строго упорядоченных дискретных значений $a_i, i = 1, \dots, n$, используется для формирования профиля предпочтений $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$, состоящего из ранжирований, представляющих интервалы I_k . Обозначим через A_k множество всех элементов из A , принадлежащих интервалу I_k , т.е. $A_k = \{a_i | a_i \in I_k \wedge a_i \in A\}$. Ясно, что его дополнение \bar{A}_k будет включать все остальные элементы из A , т.е. $\bar{A}_k = \{a_i | a_i \notin I_k \wedge a_i \in A\}$. Тогда для любого интервала I_k имеем разбиение множества A на два класса эквивалентности A_k и \bar{A}_k , т.е. $A = A_k \cup \bar{A}_k, A_k \cap \bar{A}_k = \emptyset$.

Ранжирование λ_k , наведенное интервалом I_k , удовлетворяет следующим четырем условиям для $i, j = 1, \dots, n$: (1) $a_i \in A_k \wedge a_j \notin A_k \Rightarrow a_i \succ a_j$; (2) $a_i, a_j \in A_k \vee a_i, a_j \notin A_k \Rightarrow a_i \sim a_j$; (3) $a_i \notin A_k \wedge a_j \in A_k \Rightarrow a_i \succ a_j$; (4) $a_i, a_j \in A_k$ соседние элементы $\Rightarrow j \equiv i + 1$.

Заметим, что элементы класса A_k строго предпочтительнее, чем элементы класса \bar{A}_k , т.е. всегда $\lambda_k = A_k \succ \bar{A}_k$. Следовательно, каждое ранжирование λ_k содержит единственный символ строгого порядка \succ и $n - 2$ символов толерантности \sim .

Результат комплексирования x^* для полученного профиля Λ определяется следующим образом: определяются все возможные ранжирования консенсуса $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\}$ для профиля Λ по правилу Кемени рекурсивным алгоритмом ветвей и границ RECURSALL [12]; найденные ранжирования консенсуса преобразуются в единственное итоговое ранжирование консенсуса β_{fin} по правилу свёртки, описанному в [13]; в качестве результата комплексирования x^* принимаем наиболее предпочтительное дискретное значение в итоговом ранжировании консенсуса β_{fin} . Если β_{fin} содержит более одного наилучшего дискретного значения, то в качестве естественного представителя таких значений используется выборочная медиана, рассчитываемая для числа v наилучших элементов по известной формуле:

$$x^* = \begin{cases} a_{(v+1)/2}, & \text{если } v \text{ нечетно;} \\ (a_{v/2} + a_{1+v/2})/2, & \text{если } v \text{ четно.} \end{cases} \quad (1)$$

Гистограмма изображения. Для того, чтобы воспользоваться преимуществами метода IF&PA применительно к проблеме распознавания дефектов сварного шва, воспользуемся представлением анализируемого изображения с помощью гистограммы интенсивности, представляющей собой график распределения количества пикселей по уровням интенсивности (или уровням серого цвета) оцифрованного изображения [14] (рис. 2). Значения интенсивности (горизонтальная ось гистограммы) изменяются в диапазоне от 0 до 255 или при их нормировании путем деления на 255 — от 0 до 1. Значение 0 соответствует самому темному, т.е. чистому черному цвету, а максимальное значение интенсивности 255 (или 1 при нормировании) соответствует чистому белому цвету. Таким образом, чем больше пикселей изображения располагаются в области гистограммы, близкой к равной 0 интенсивности, тем темнее изображение; и чем больше пикселей изображения располагаются в области гистограммы, близкой к интенсивности, равной 255, тем светлее изображение. Часто на горизонтальной оси гистограммы выделяют пять зон одинаковой ширины l [14] (см. рис. 2) по степени интенсивности тона: черную, темную, среднюю, светлую и белую. Из рассмотрения большого количества разных изображений сварных швов следует, что большинство пикселей дефектной области принадлежат черной зоне гистограммы, а большинство пикселей бездефектной области принадлежат белой зоне гистограммы.

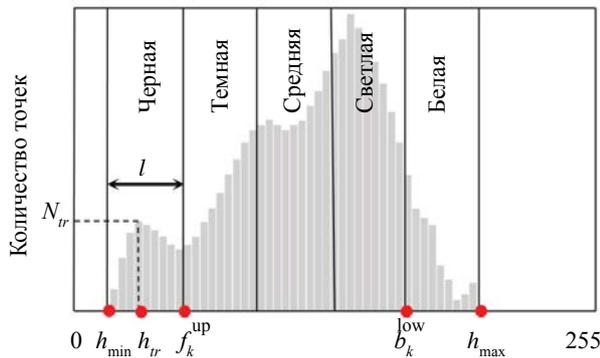


Рис. 2. Гистограмма изображения и ее зонирование.



Рис. 3. Пример разбиения изображения S на горизонтальные полосы шириной L .

Для того, чтобы выявить информацию о начальных точках дефектной и бездефектной областей, исходное полутоновое изображение сварного соединения, представленное $(r \times q)$ матрицей S пикселей, необходимо разбить на несколько фрагментов, каждый из которых будет характеризоваться своим распределением интенсивности пикселей. Самой простой реализацией этой идеи является формирование из анализируемого изображения m горизонтальных (или вертикальных) *полос равной ширины* L (рис. 3), где $m = r / L$ (или $m = q / L$). Тогда по гисто-

граммам полос можно определить соответствующие интервалы $\{I_k\}$ яркости образующих их пикселей [15].

По гистограммам полос следует определять два набора по m интервалов — для переднего плана изображения (черной, т.е. дефектной, области) и для заднего плана (фона) изображения (белой, т.е. бездефектной, области). Тогда процедура IF&PA позволит вычислить робастные значения оценок интенсивностей переднего и заднего планов для каждого из двух наборов интервалов, которые служат порогами для выбора начальных точек в методе НО.

Рассмотрим теперь, как вычислить границы интервалов $\{I_k\}$, характеризующих гистограммы яркости этих полос, а также как выбрать подходящую ориентацию и число m полос разбиения изображения в зависимости от размера дефекта.

Определение границ исходных интервалов. Построим гистограмму интенсивности каждой полосы k полутонового изображения. Для каждой k -й гистограммы определяем два интервала: интервал $F_k = [f_k^{\text{low}}, f_k^{\text{up}}]$, представляющий дефектную область, и интервал $B_k = [b_k^{\text{low}}, b_k^{\text{up}}]$, представляющий бездефектную область. Для этого на k -й гистограмме формируем пять зон (как показано на рис. 2) шириной

$$l = 0,2(h_{\max} - h_{\min}), \quad (2)$$

где h_{\min} , h_{\max} — минимальная и максимальная интенсивности k -й полосы. Тогда границы интервалов F_k и B_k , представляющих соответственно дефектную и бездефектную области, определяются следующим образом:

$$f_k^{\text{low}} = h_{\min}; f_k^{\text{up}} = h_{\min} + l; b_k^{\text{low}} = h_{\max} - l; b_k^{\text{up}} = h_{\max}. \quad (3)$$

Выбор ориентации полос при разбиении изображения. Рассмотрим прямоугольник Z площадью $z_1 \times z_2$, где z_1 и z_2 — размер Z в пикселях по вертикали и горизонтали соответственно. Ориентация Z совпадает с ориентацией дефекта и большинство (больше половины) пикселей в Z принадлежат дефектной области (см. рис. 3). Ясно, что ориентация полос всегда перпендикулярна ориентации прямоугольника Z .

Пусть h_r — это интенсивность, которую имеет наибольшее количество N_r пикселей в *черной области гистограммы* (см. рис. 3). Выберем не менее трех максимально удаленных друг от друга на изображении пикселей, имеющих интенсивность h_r . Прямые вертикальные и горизонтальные линии, проходящие через эти пиксели, определяют ограничивающий дефектную область прямоугольник Z , соотношение размеров которого определяет ориентацию полос: если $z_1 > z_2$, то ориентация полос горизонтальная, если $z_1 \leq z_2$, то ориентация вертикальная.

Выбор количества m полос. Пусть m_1 — это количество полос, содержащих пиксели дефектной области; m_2 — количество полос, содержащих пиксели только бездефектной области. Ясно, что $m_1 + m_2 = m$. Достаточно определить значение m , при котором выполняется условие $m_1 \geq m_2$ для случая горизонтальной ориентации полос ($z_1 > z_2$).

Пусть $z'_1 = r - z_1$ и $z'_2 = q - z_2$ — это параметры дополнения Z' ограничивающего прямоугольника Z до всего изображения C размером $(r \times q)$ пикселей, т.е. $Z' = C \setminus Z$.

Если $z_1 \geq z'_1$ (т.е. размер дефекта сравним с размером изображения C), то $m_1 \geq m_2$ для всех m . В статье [16] с помощью моделирования по схеме последовательных испытаний Бернулли показано, что в такой ситуации можно брать значения m равными от 4 до 15. Это означает что, при $m > 15$ точность сегментации практически не увеличивается.

Если $z_1 < z'_1$ (т.е. размер дефекта мал по сравнению с размером изображения C), то, чтобы выполнялось условие $m_1 \geq m_2$, следует подобрать некоторое натуральное число $u < L$, обеспечивающее выполнение равенств $m_1 = (z_1 + u)/L$ и $m_2 = (z'_1 - u)/L$. Например, для изображения на рис. 3 имеем следующие значения параметров: $r = 12$; $q = 9$; $z_1 = 5$; $z_2 = 3$. Поскольку $z_1 > z_2$, то ориентация полос горизонтальная. Ясно, что $z'_1 = 12 - 5 = 7$ и $z_1 < z'_1$. Выбираем $u = 1$, откуда $m_1 = m_2$. Тогда выбираем $L = 2$, обеспечивая максимальное значение $m = 12/2 = 6$.

МЕТОД НАРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ

Начальные точки после определения с помощью IF&PA маркируются одной из двух областей — дефектной E или бездефектной P . Затем наборы этих точек расширяются путем их объединения с точками, которые имеют близкую интенсивность и не маркированы. Нарастивание области происходит последовательно с учетом текущего значения ее дисперсии интенсивности.

Предположим, что дефектная область E включает в себя пиксели x_i с интенсивностью h_i . Среднее значение H_E и дисперсия интенсивности V_E для дефектной области E в целом рассчитываются следующим образом:

$$H_E = (1/|E|) \sum_{i=1}^{|E|} h_i, \quad (4)$$

$$V_E = (1/(|E|-1)) \sum_{i=1}^{|E|} (h_i - H_E)^2, \quad (5)$$

где $|E|$ — размер (число точек) области E .

Пусть дефектная область E имеет набор соседей S_E , определяемых с использованием известного понятия восьмисвязности, когда пиксели считаются соседними, если их координаты по вертикали, горизонтали и диагонали отличаются не более чем на единицу [14]. Тогда точки x считаются соседями области E , если $x \in S_E$ и $x \notin E$.

Предположим, что точка $x \in S_E$ включена в область E , тогда среднее значение и дисперсия интенсивности области E изменятся в зависимости от значения интенсивности точки x . Обозначим через $V_E(x)$ дисперсию интенсивности точки $x \in S_E$. Определим точку $x_{V_E \min} \in S_E$ с минимальной дисперсией $V_{E \min}$ для области E следующим образом:

$$x_{V_E \min} = \arg \min_{x \in S_E} V_E(x); \quad V_{E \min} = \min \{V_E(x) | x \in S_E\}. \quad (6)$$

Аналогичным образом определяется точка $x_{V_P \min} \in S_P$ с минимальной дисперсией $V_{P \min}$ для бездефектной области P .

Дисперсия интенсивности области показывает отклонение интенсивностей ее пикселей и по отношению к интенсивности центрального пикселя (принятой за среднее значение) области. Невысокое значение дисперсии показывает, что интенсивность точек незначительно отличается от среднего значения интенсивности области или что точки области имеют практически одинаковую интенсивность. И наоборот, чем больше дисперсия, тем больше разница интенсивностей точек области. Заметим, что дефектная E и бездефектная P области порождаются начальными точками с одинаковой интенсивностью, т.е. метод НО начинает работу при нулевых дисперсиях областей E и P .

Таким образом, в основу метода НО можно положить следующий принцип: в область включается та точка, которая изменяет ее дисперсию в наименьшей степени, т.е. если $V_{E \min} \leq V_{P \min}$, то пиксель $x_{V_E \min}$ включается в область E , иначе пиксель $x_{V_P \min}$ включается в область P . Этот процесс продолжается, пока не будут исчерпаны все точки, т.е. выполнится равенство $|E| + |P| = |C|$.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ

Описанные выше предложения по созданию системы автоматического распознавания дефектов сварных соединений (АРДС) были реализованы авторами в среде технических вычислений Matlab 2020b. Система АРДС является дальнейшим развитием системы АРД, описанной в предыдущей статье авторов [2]. Опишем последовательность действий алгоритма АРДС на примере обнаружения дефекта «прожог» (подгруппа 510 стандарта ГОСТ Р ИСО 6520 [7]) по фотографическому изображению сварного шва (см. рис. 4). Это как раз тот вид дефекта, при распознавании которого предыдущая версия системы в подавляющем большинстве экспериментов вынуждена была использовать интерактивный (ручной) режим [2].

1. На вход алгоритма подается цветное изображение сварного шва в формате RGB размером (180×240) пикселей (рис. 4а), которое преобразуется в полутоновое изображение B с помощью функции *rgb2gray*; для подавления яркостных помех с помощью функции *imgaussfilt* (фильтр Гаусса при стандартном отклонении $\sigma = 2$) изображение B преобразуется в полутоновое изображение C с низким уровнем шума (рис. 4б).

2. Пользуясь рекомендациями раздела «Комплексообразование интервалов агрегированием предпочтений», выбираем число полос $m = 10$ и горизонтальную ориентацию полос; с помощью функции *imcrop* формируем 10 полутоновых изображений C_1, C_2, \dots, C_{10} одинаковой высоты $L = 24$ (рис. 5).

3. Строим гистограмму каждой полосы C_k , $k = 1, 2, \dots, 10$, с помощью функции *imhist* (см. рис. 5).

4. Для каждой гистограммы C_k по формулам (2) и (3) определяем два интервала: интервал $F_k = [f_k^{\text{low}}, f_k^{\text{up}}]$, представляющий дефектную область, и интервал $B_k = [b_k^{\text{low}}, b_k^{\text{up}}]$, представляющий

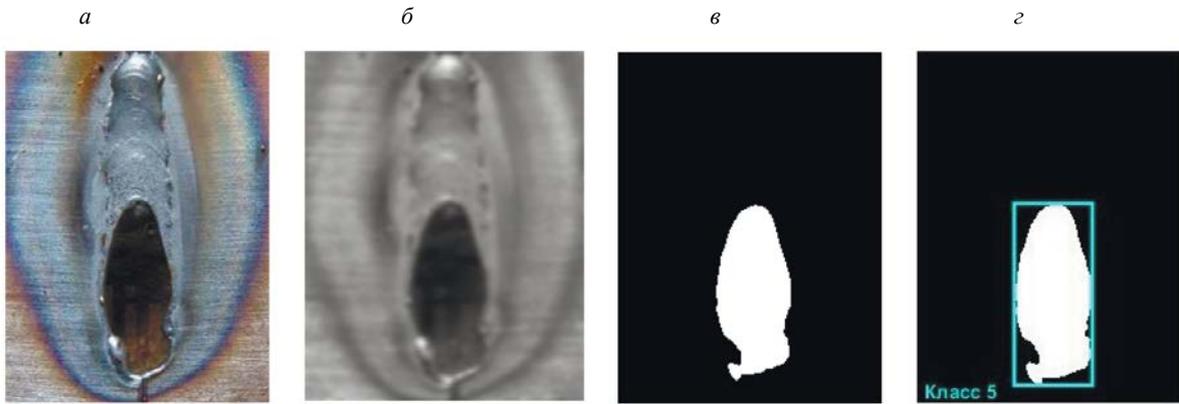


Рис. 4. Сегментация дефекта типа «прожог»: *a* — исходное изображение; *б* — отфильтрованное изображение *C*; *в* — результат работы алгоритма НО с начальными точками, выбранными с помощью IF&PA; *г* — результат классификации дефекта.

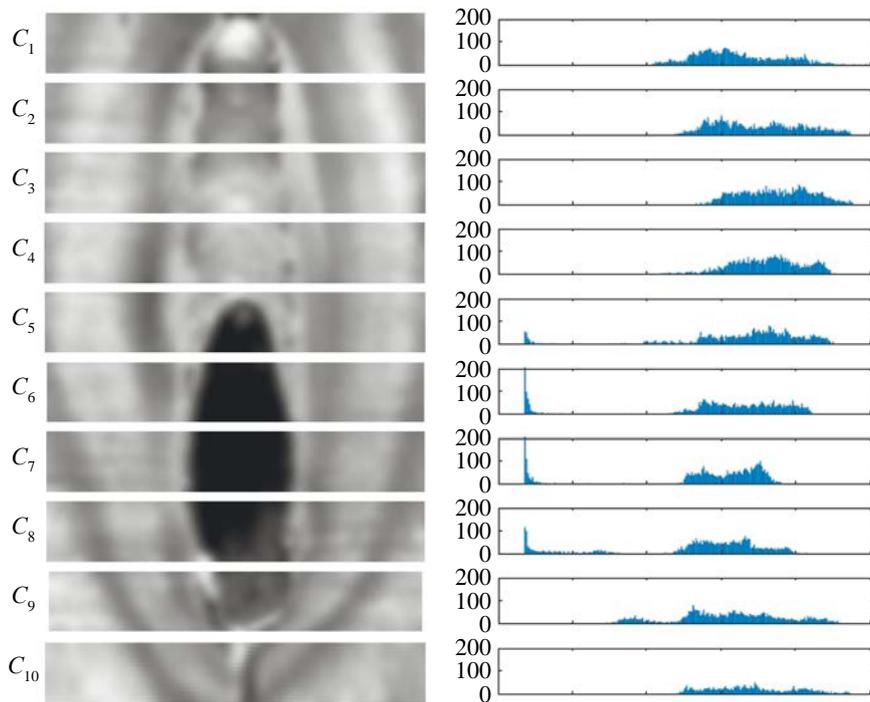


Рис. 5. Разбиение изображения *C* на 10 горизонтальных полос C_1, C_2, \dots, C_{10} и их гистограммы.

бездефектную область. Значения границ соответствующих интервалов для рассматриваемого примера представлены в табл. 1.

7. Набор интервалов $F_k, k = 1, 2, \dots, 10$, для дефектной области подаем на вход процедуры IF&PA, которая формирует диапазон актуальных значений $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{10}\}$, как показано на рис. 6. Нижняя граница ДАЗ $a_1 = 18$, верхняя граница $a_{10} = 150$, норма $h = 150 - 18 / 9 \approx 14,67$. Полученные десять дискретных значений интенсивности a_1, a_2, \dots, a_{10} показаны на левой вертикальной оси на рис. 6. Соответствующие интервалам ранжирования, представленные в короткой форме, формируют профиль предпочтения, показанный в правой части рис. 6.

На выходе процедуры IF&PA после свертки 48 ранжирований Кемени, найденных алгоритмом RECURSALL, получаем итоговое ранжирование консенсуса $\beta_{\text{fin}}: a_2 \sim a_3 \succ a_1 \sim a_7 \succ a_6 \sim a_8 \succ a_4 \sim a_9 \sim a_{10} \succ a_5$.

Поскольку итоговое ранжирование содержит две наилучшие альтернативы $a_2 \sim a_3$, т.е. $v = 2$, по формуле (1) получаем $x^* = (a_2 + a_3) / 2 = (32,67 + 47,33) / 2 = 40,0$. Найденный результат комплек-

Границы интервалов F_k и B_k , представляющих дефектную и бездефектную области

Полоса C_k	Интервал F_k		Интервал B_k	
	f_k^{low}	f_k^{up}	b_k^{low}	b_k^{up}
C_1	82	115	216	249
C_2	97	125	209	237
C_3	128	150	217	239
C_4	97	123	201	227
C_5	18	60	185	227
C_6	18	57	173	212
C_7	18	53	158	193
C_8	18	59	182	223
C_9	69	103	205	239
C_{10}	85	116	207	238

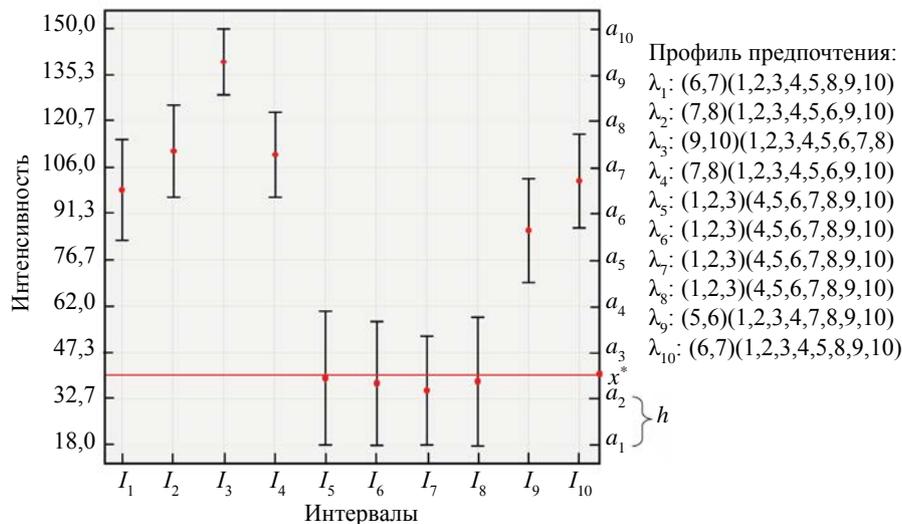


Рис. 6. Работа процедуры IF&PA с входными данными дефектной области.

сирования принимается за значение интенсивности начальной точки дефектной области $f = x^* = 40$ при последующем применении метода НО.

8. Набор интервалов B_k , $k = 1, 2, \dots, 10$, для бездефектной области подаем на вход процедуры IF&PA, которая формирует новый диапазон актуальных значений $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{10}\}$, как показано на рис. 7. В этом случае нижняя граница ДАЗ $a_1 = 158$, верхняя граница $a_{10} = 249$, норма $h \approx 10,11$.

Были получены 12 ранжирований Кемени, которые после свертки дали следующее итоговое ранжирование консенсуса $\beta_{\text{fin}}: a_7 \succ a_6 \succ a_8 \succ a_4 \succ a_5 \succ a_9 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_1 \succ a_{10}$, откуда получаем $x^* = a_7 = 218,67$. Найденный результат комплексирования принимается за значение интенсивности начальной точки бездефектной области $b = x^* = 219$ при последующем применении метода НО.

9. Запускаем реализующую метод НО функцию $D = \text{regionGrowing}(C, f, b)$, где D — изображение после сегментации, C — изображение, полученное на шаге 1, f и b — значения интенсивности, представляющие дефектную и бездефектную области, полученные на шагах 7 и 8 соответственно. Результатом является бинаризованное изображение D (см. рис. 4в), где белым цветом представлена область дефекта сварного шва (если он существует).

10. Определение одного из шести классов (1 — отсутствие дефекта; 2 — полость; 3 — продольная трещина; 4 — поперечная трещина; 5 — прожог; 6 — два и более дефектов классов 2—5) дефекта $Class$ по значениям геометрических признаков дефектной области сварного шва

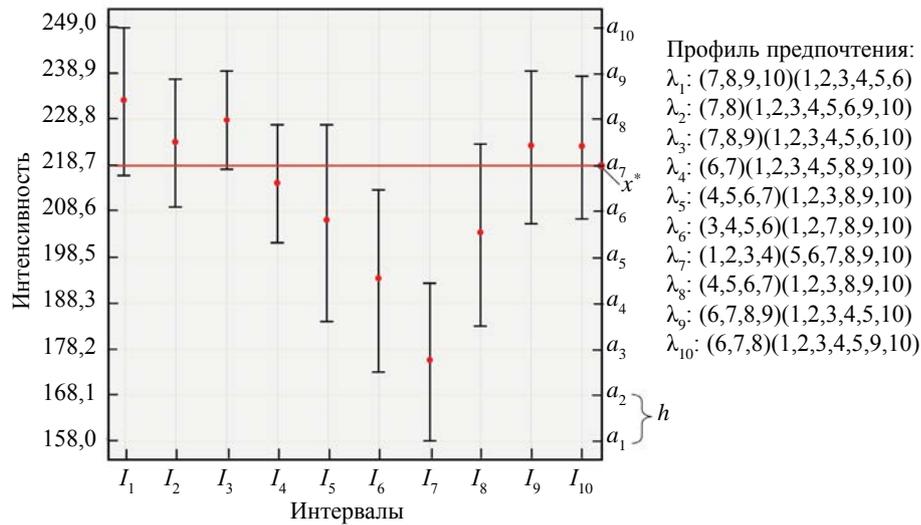


Рис. 7. Работа процедуры IF&PA с входными данными бездефектной области.

на изображении D , таким как длина, ширина, коэффициент заполнения, коэффициент округлости, коэффициент прямоугольности и т.д., как описано в статье авторов [2] (см. рис. 4г).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предложенный алгоритм АРДС был протестирован на наборе из 87 различных изображений сварных швов с дефектами всех шести определяемых на шаге 10 алгоритма классов, полученных в свободном доступе из сети Интернет. Для сравнения те же изображения предъявлялись реализованным в среде Matlab традиционным популярным методам распознавания: методу Оцу [17, 18] (определяет оптимальный порог для различения дефектной и бездефектной областей по минимальной дисперсии) и методу k -средних [19] (пиксели изображения классифицируются на k групп данных в соответствии с характеристиками интенсивности цвета).

Результаты распознавания, полученные в интерактивном (ручном) режиме АРДС, были использованы в ходе экспериментальных исследований как заведомо правильные (истинные) для оценки качества распознавания исследуемыми тремя методами с использованием меры сходства Жаккара J [20], известной также как *intersection over union* (IoU) [21]. Мера определяется как отношение мощности пересечения множеств A и B к мощности их объединения, где A — область дефекта, распознанного одним из трех методов, а B — область реального дефекта, полученного в ручном режиме. Формула для расчета меры Жаккара имеет вид:

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{|A \cap B|}{|A| + |B| - |A \cap B|}. \quad (7)$$

Значение меры J находится в диапазоне $[0, 1]$. Если $J = 0$, то объекты A и B не пересекаются, т.е. дефект A не распознан; если $J = 1$, то A и B полностью совпадают, т.е. дефект A полностью распознан.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 2, показывают, что из 87 протестированных изображений 83 изображения были распознаны правильно предложенным алгоритмом АРДС. Это значит, что для этого конкретного набора протестированных изображений точность АРДС достигает 95,4 % и превышает точность традиционных методов Оцу (57,4 %) и k -средних (71,3 %). В табл. 2 приведена также точность каждого исследованного метода по отдельным классам дефектов. Используемый здесь показатель «точность» (ассигасу) является одной из распространенных, простейшей и интуитивно понятной оценкой качества распознавания, рассчитываемой как выраженная в процентах доля правильно распознанных дефектов среди всех предъявленных объектов.

Для каждого результата распознавания исследуемых дефектов были рассчитаны значения меры Жаккара, которые в усредненном виде по каждому классу дефектов и используемому методу приведены в табл. 3. Конкретные примеры исследуемых изображений дефектов и результаты их распознавания с соответствующими значениями меры J даны на рис. 8.

Количество автоматически распознанных дефектов

Класс. Наименование дефекта	Предъявлено	Распознано методом			Точность метода, %		
		Оцу	<i>k</i> -средних	АРДС	Оцу	<i>k</i> -средних	АРДС
1. Отсутствие дефекта	10	10	10	10	100	100	100
2. Полость	14	9	11	13	64,3	78,6	92,9
3. Продольная трещина	21	8	13	20	38,1	61,9	95,2
4. Поперечная трещина	14	10	10	14	71,4	71,4	100
5. Прожог	13	7	10	12	53,8	76,9	92,3
6. Два и более дефектов классов 2 – 5	15	6	8	14	40,0	53,3	93,3
Всего	87	50	62	83	57,4	71,3	95,4

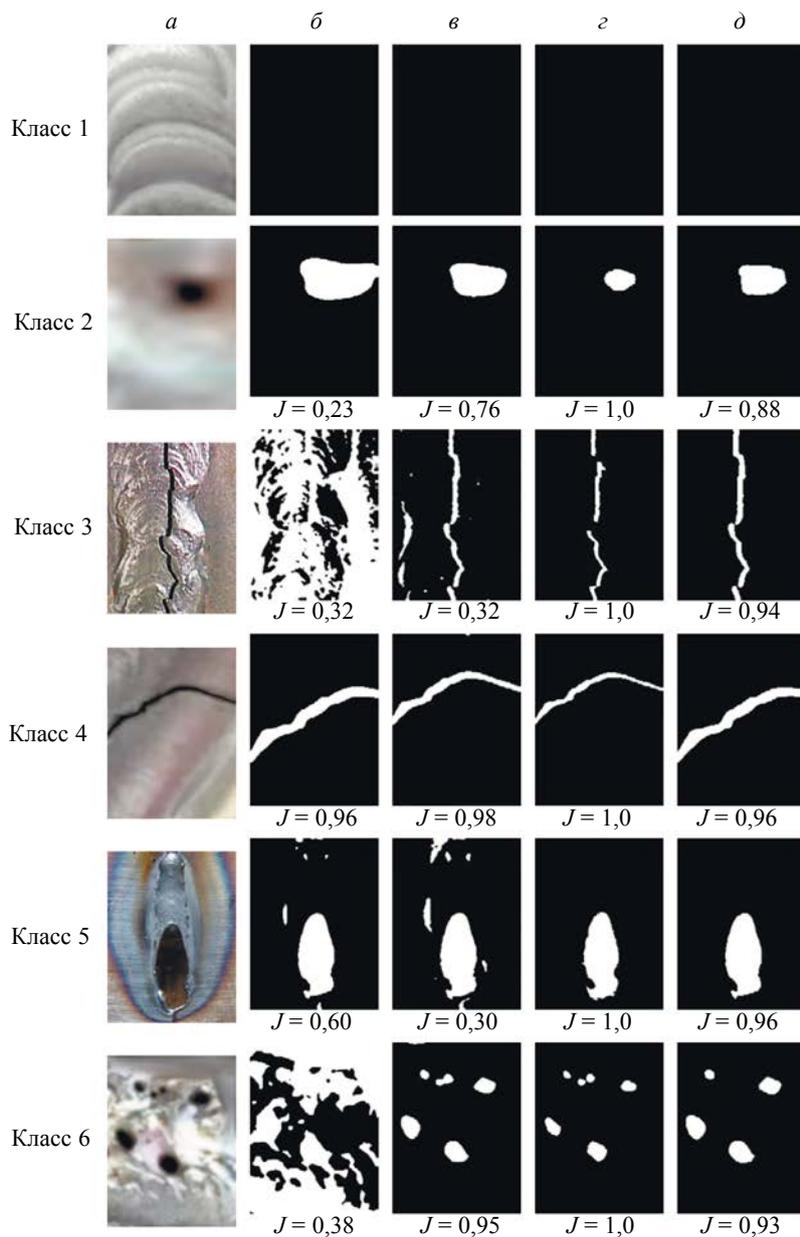


Рис. 8. Примеры результатов распознавания различных классов дефектов сварных швов: а — исходное изображение; б — метод Оцу; в — метод *k*-средних; г — алгоритм АРДС (ручной режим); д — алгоритм АРДС (автоматический режим).

Таблица 3

Усредненные значения меры J при распознавании разных классов дефектов

Класс. Наименование дефекта	Метод Оцу	Метод k -средних	АРДС
1. Отсутствие дефекта	–	–	–
2. Полость	0,59	0,71	0,78
3. Продольная трещина	0,49	0,64	0,83
4. Поперечная трещина	0,71	0,69	0,88
5. Прожог	0,53	0,67	0,87
6. Два и более дефектов классов 2—5	0,47	0,64	0,76

Из данных табл. 2, 3 и рис. 8 следует, что предложенный алгоритм АРДС имеет преимущества перед традиционными методами при автоматическом обнаружении дефектов сварных швов на всех классах дефектов. Особенно явными эти преимущества являются в тех случаях, когда дефект представляет собой продольную трещину или распространяется вдоль изображения, или имеет относительно большую площадь по сравнению с анализируемым изображением. Результаты экспериментов также показывают, что АРДС эффективно устраняет мешающие правильному распознаванию элементы на изображении.

Из экспериментальных данных также следует, что выигрыш от применения алгоритма АРДС несколько снижается в следующих случаях: площадь дефекта слишком мала по сравнению с размерами анализируемого изображения; изображение имеет темные бездефектные участки; разница между интенсивностями цвета дефектных и бездефектных участков невелика. Преодоление этих трудностей составляет предмет дальнейших исследований по совершенствованию предложенного подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен метод АРДС для автоматической сегментации изображений при обнаружении дефектов поверхности сварного шва, основанный на методе последовательного наращивания дефектной и бездефектной областей, начальные пороговые значения интенсивности пикселей которых автоматически определяются методом комплексирования интервалов агрегированием предпочтений.

Результаты экспериментальных исследований 87 изображений сварных соединений показали, что предложенный алгоритм корректно распознал 83 дефекта, т.е. характеризуется точностью 95,4 %, которая превысила точность таких известных методов распознавания, как метод Оцу и метод k -средних.

Заметим, что АРДС не предназначен для распознавания изображений, на которых присутствуют края свариваемых деталей (не обязательно прямолинейные), значительные перепады высоты (выступы или впадины), неметаллические вставки и т.д. Эти изображения не содержат дефекты, но за таковые могут быть приняты изменения интенсивности пикселей, которые появляются на изображении из-за перепадов рельефа объекта контроля [22]. Решение подобных проблем — предмет дальнейших исследований по теме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nacereidine N., Goumeidane A.B., Ziou D.* Unsupervised weld defect classification in radiographic images using multivariate generalized Gaussian mixture model with exact computation of mean and shape parameters // *Computers in Industry*. 2019. V. 108. P. 132—149.
2. *Муравьев С.В., Погадаева Е.Ю.* Автоматизированное распознавание дефектов сварных соединений при визуальном контроле с использованием геометрических признаков // *Дефектоскопия*. 2020. № 3. С. 49—57.
3. *Mery D., Pieringer C.* *Computer Vision for X-Ray Testing: Imaging, Systems, Image Databases, and Algorithms*. Springer. 2021. 456 p. ISBN 978-3-030-56768-2.
4. *Zhang L., Zhang Y., Dai B., Chen B., Li Y.* Welding defect detection based on local image enhancement // *IET Image Processing*. 2019. V. 13. P. 2647—2658.
5. *Yazid H., Arof H., Yazid H.* Automated thresholding in radiographic image for welded joints // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2012. V. 27. No. 1. P. 69—80.

6. Zahran O., Kasban H., El-Kordy M., Abd El-Samie F.E. Automatic weld defect identification from radiographic images // *NDT & E International*. 2013. V. 57. P. 26—35.
7. ГОСТ Р ИСО 6520—1—2012. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением.
8. Mancas M., Gosselin B., Macq B. Segmentation using a region-growing thresholding // *Proceedings of SPIE. Image Processing: Algorithms and Systems IV*. 2005. V. 5672. P. 388—398.
9. Sheela C.J.J., Suganthi G. Morphological edge detection and brain tumor segmentation in Magnetic Resonance (MR) images based on region growing and performance evaluation of modified Fuzzy C-Means (FCM) algorithm // *Multimedia Tools and Applications*. 2020. V. 79. P. 17483—17496.
10. Muravyov S.V., Khudonogova L.I., Emelyanova E.Y. Interval data fusion with preference aggregation // *Measurement*. 2018. V. 116. P. 621—630.
11. Muravyov S.V., Khudonogova L.I., Ho M.D. Analysis of heteroscedastic measurement data by the self-refining method of interval fusion with preference aggregation — IF&PA // *Measurement*. 2021. V. 183. P. 109851.
12. Muravyov S.V. Ordinal measurement, preference aggregation and interlaboratory comparisons // *Measurement*. 2013. V. 46. No. 8. P. 2927—2935.
13. Muravyov S.V., Emelyanova E.Y. Kemeny rule for preference aggregation: reducing all exact solutions to a single one // *Measurement*. 2021. V. 182. P. 109403.
14. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
15. Muravyov S.V., Pogadaeva E.Yu. Recognition Ability of Interval Fusion with Preference Aggregation in Weld Defects Images Analysis / 17th IMEKO TC10 Conference «Global Trends in Testing, Diagnostics & Inspection for 2030», Dubrovnik, Croatia. October 19—22. 2020. P. 271—276.
16. Муравьев С.В., Маринушкина И.А. Обоснование выбора числа участников межлабораторных сличений // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. № 4. 2015. С. 81—90.
17. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. V. 9. No. 1. P. 62—66.
18. Zhan Y., Zhang G. An improved OTSU algorithm using histogram accumulation moment for ore segmentation // *Symmetry*. 2019. V. 11. No. 3. P. 431.
19. Dhanachandra N., Manglem K., Chanu Y.J. Image segmentation using K-means clustering algorithm and subtractive clustering algorithm // *Procedia Computer Science*. 2015. V. 54. P. 764—771.
20. Levandowsky M., Winter D. Distance between Sets // *Nature*. 1971. V. 234. P. 34—35.
21. Zhou D., Fang J., Song X., Guan C., Yin J., Dai Y., Yang R. IoU loss for 2D/3D object detection / *Proceedings of the 7th International Conference on 3D Vision*. Québec City, Canada, September 16—19, 2019. V. 1. P. 85—94.
22. Dedkova A.A., Florinsky I.V. Geomorphometry and microelectronic metrology: Converged realms // *Transactions in GIS*. 2023. V. 27. No. 6. P. 1642—1661.

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДЕГРАДАЦИИ ПЛЕНОК ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ЕГО МОДИФИКАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

© 2023 г. Е.Н. Вазирова^{1,*}, Р.М. Абашев^{2,**}, И.И. Мильман^{2,***}, А.И. Сурдо^{2,****}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

²Институт физики металлов УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

E-mail: *e.n.agdantseva@urfu.ru; **abashevrm@imp.uran.ru; ***milman@imp.uran.ru; ****surdo@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 21.09.2023; после доработки 21.09.2023

Принята к публикации 03.10.2023

Описан способ контроля деградации оптической плотности пленок политетрафторэтилена и его модификации, сополимера тетрафторэтилена и этилена, облученных электронами с энергиями 100 кэВ и 10 МэВ. Способ основан на измерении оптической плотности облученных пленок в диапазоне энергии зондирующих квантов 1—6 эВ и подтвержден установленными зависимостями «доза—оптическое поглощение». В частности, обнаружен совершенно разный характер радиационной деградации оптических свойств двух типов исследуемых пленок, выявляемый описанным способом. При увеличении дозы облучения у пленок политетрафторэтилена наблюдается «эффект просветления» в области 2—5 эВ и появление полосы поглощения при 5,6 эВ, а у пленок сополимера тетрафторэтилена и этилена — одновременный рост трех полос поглощения при 4,0, 4,6 и 5,5 эВ. Приведены доказательства важной роли величины оптической плотности пленок в функционировании устройств космической техники.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, сополимер тетрафторэтилена и этилена, электронный пучок, дозы облучения, спектры оптического поглощения.

OPTICAL CONTROL OF DEGRADATION OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE FILMS AND ITS MODIFICATION UNDER ELECTRON IRRADIATION

E.N. Vazirova^{1,*}, R.M. Abashev^{2,**}, I.I. Milman^{2,***}, A.I. Surdo^{2,****}

¹Ural Federal University, Yekaterinburg 620002 Russia

²Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108 Russia

E-mail: *e.n.agdantseva@urfu.ru; **abashevrm@imp.uran.ru; ***milman@imp.uran.ru; ****surdo@imp.uran.ru

A method for monitoring the degradation of the optical density in polytetrafluoroethylene films and its modification, a copolymer of tetrafluoroethylene and ethylene, irradiated by electrons with energies of 100 keV and 10 MeV is described. The method is based on measuring the optical density of irradiated films in the photon energy range of 1—6 eV and is confirmed by established «dose-optical absorption» relationships. In particular, using the described method, a completely different nature of the radiation degradation of the optical properties of the two types of films under study was discovered. With an increase in the irradiation dose, «bleaching effect» in the region of 2—5 eV and the appearance of an absorption band at 5.6 eV are observed in polytetrafluoroethylene films. With a similar dose increase, three absorption bands at 4.0, 4.6 and 5.5 eV appear and grow in films of copolymer of tetrafluoroethylene and ethylene. The evidence of the critical role of the optical density of films in the functioning of space technology devices is given.

Keywords: polytetrafluoroethylene, copolymer of tetrafluoroethylene and ethylene, electron beam, radiation dose, optical absorption spectra

DOI: 10.31857/S0130308223120059, EDN: XIFQPF

ВВЕДЕНИЕ

Среди полимерных материалов, широко используемых в электронном приборостроении, медицине, космической и ядерной индустрии, особое место занимают политетрафторэтилен (ПТФЭ, торговая марка фторопласт Ф-4, PTFE в зарубежной литературе, химическая формула $(C_2F_4)_n$) и его структурная модификация — сополимер тетрафторэтилена и этилена (ЭТФЭ, торговая марка Ф-40, ETFE в зарубежной литературе, имеющая химическую формулу $(CF_2-CF_2-CH_2-CH_2)_n$) [1]. Растиющая потребность в применении объемных и, особенно, пленочных форм этих материалов [2] обусловлена их уникальными физикохимическими свойствами, они остаются гибкими и эластичными при температурах от -70 до 270 °С в высоком и сверхвысоком вакууме, не смачиваются ни водой, ни жирами, ни большинством органических растворителей, не разрушаются под влиянием щелочей, кислот и даже смеси азотной и соляной кислот. Плотность материала, его эффективный

атомный номер близки к плотности и эффективному атомному номеру биологической ткани [3]. Перечисленные выше свойства явились основанием для изготовления из фторопласта искусственных заменителей сосудов кровеносной системы, протезов в хирургии, кардиологии и стоматологии [4]. Рекордно высокое удельное электрическое сопротивление фторопласта ($\rho = 10^{19}$ Ом \times м) и низкое значение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta = 10^{-4}$) позволяют использовать его в качестве конструкционных и изоляционных материалов в технике высоких напряжений, в высокочастотных линиях передачи электрических сигналов вплоть до гига- и терагерцовых диапазонов частот.

Уникальными физикохимическими свойствами объемных и пленочных форм ПТФЭ и ЭТФЭ определяются их преимущественные области применения. Как правило, это там, где имеет место одновременное и долговременное, десятки лет, действие суммы ряда экстремальных факторов внешней среды: глубокий вакуум, высокое давление, термоциклирование в диапазоне от криогенных до нескольких сотен градусов, влажность, солнечная радиация, потоки ионов кислорода, водорода, протонов, электронов, нейтронов высоких энергий. В этих условиях со временем изменяются функциональные свойства материалов, контроль и прогнозирование которых в ряде специальных применений, является принципиально необходимым.

Анализ литературных данных показывает, что для практических целей, например, в космической индустрии, наиболее востребованными оказались пленочные формы ПТФЭ и ЭТФЭ с толщинами от 20 до 150 мкм. Так, полимерная пленка ПТФЭ толщиной 127 мкм с односторонней металлизацией (слой алюминия, серебра или золота) покрывает наружную поверхность космического аппарата и выступает в роли радиатора [5]. При этом металлизированная сторона пленки контактирует с поверхностью аппарата. В космическом пространстве пленка-радиатор подвергается воздействию солнечной радиации и ионизирующих излучений. Слой металла является эффективным отражателем солнечного излучения, слабо поглощающего прозрачной частью пленки, и также служит эффективным излучателем теплового излучения с длинами волн 2—25 мкм, обусловленного потоком тепла из космического аппарата. Такой радиатор обеспечивает рабочую температуру поверхности аппарата в диапазоне от -40 до $+65$ °С. В теоретической формуле для оценки равновесной температуры поверхности космического аппарата [5, 6] присутствует оптическая плотность пленки, увеличение которой при радиационном воздействии (радиационная деградация) приводит к нарушению работоспособности радиатора. В общем случае, в результате процессов деградации, индуцированных ионизирующим излучением, изменяются механические, тепловые и диэлектрические свойства полимерных материалов, и, что особенно, оптические свойства пленок ПТФЭ и ЭТФЭ [7—10]. Контроль за этими изменениями и их прогнозирование является актуальным и чрезвычайно важным для долговременного обеспечения выполняемых материалом функций.

Целью данной работы являлось разработка способа контроля радиационной деградации оптической плотности пленочных полимерных материалов на примере отечественных марок политетрафторэтилена и его модификации, сополимера тетрафторэтилена и этилена.

МЕТОДИКА И ОБРАЗЦЫ

Объектом исследований являлись образцы отечественных пленок ПТФЭ и ЭТФЭ прямоугольной формы 3×10 мм² и толщиной 20 и 25 мкм соответственно. Образцы пленок ЭТФЭ предоставлены «АО Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)» (г. Санкт-Петербург). Пленки облучались при комнатной температуре электронными пучками, в одном случае полученными от малогабаритного импульсного ускорителя электронов типа «Арина-02» (трубка ИМА2-150Э) с энергией электронов $E = 100$ — 150 кэВ, длительностью импульса $\tau_p = 10$ нс и частотой их следования $f = 10$ Гц, в другом — от ускорителя УЭЛР-10-10С ($E = 10$ МэВ, $\tau_p = 13,5$ мс, $f = 230$ Гц) при среднем токе $I = 800$ мА. Поглощенная доза, получаемая образцом за один импульс «Арины-02», составляла 1,1 кГр. Аналогичная величина в случае применения ускорителя УЭЛР-10-15С была 0,05 кГр. Поглощенные дозы облучения исследуемых образцов пленок ПТФЭ и ЭТФЭ варьировались в диапазонах от 10 до 7870 кГр. Дозы из поддиапазонов 10—50 кГр определялись дозиметрическими цветными пленками СО ПД (Ф)Р — 5/50 с погрешностью не более ± 7 % при доверительной вероятности $P = 0,95$. Дозы из поддиапазонов 50—7870 кГр оценивались расчетным путем с учетом дозы, получаемой за один импульс, и количества импульсов.

Спектры оптического поглощения исходных и облученных образцов пленок регистрировались автоматическим спектрофотометром Cary 60. Поскольку толщины исследуемых пленок были разные, для сравнения спектры поглощения представлялись в виде зависимостей коэффициента оп-

тического поглощения k от энергии квантов $h\nu$. Переход от оптической плотности D к величине k проводился по следующей формуле:

$$k(h\nu) = 2,303 \cdot D(h\nu)/d, \quad (1)$$

где d — толщина пленок ПТФЭ и ЭТФЭ. В ряде случаев для детального анализа изменений в спектрах оптического поглощения пленок, вызванных их облучением электронным пучком, рассчитывались разностные спектры $\Delta k(h\nu)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физической основой способа контроля оптической плотности пленок ПТФЭ и ЭТФЭ являлись экспериментально установленные для них связи изменений коэффициентов оптического поглощения в зависимости от поглощенной дозы электронного излучения.

На рис. 1 приведены спектры оптического поглощения пленки ПТФЭ до (кривая 1) и после облучения электронным пучком с энергией 100 кэВ дозами 11 кГр (2), 2620 кГр (3) и 7870 кГр (4). На вставке изображены разностные спектры поглощения, полученные вычитанием спектра пленки до облучения из спектров, измеренных после облучения дозами 2620 кГр (5) и 7870 кГр (6). Как видно, с ростом дозы облучения наблюдаются увеличивающиеся просветление пленки ПТФЭ в области 2—5 эВ с экстремумом при 4,5 эВ и появление при дозе 2620 кГр полосы с максимумом вблизи 5,6 эВ (см. вставку), которая при дальнейшем повышении дозы до 10^4 кГр явно не проявляется. Аналогичные изменения спектров поглощения имеют место при облучении пленок ПТФЭ электронами с энергией 10 МэВ. Однако из-за незначительности дозы облучения, получаемой пленкой за один импульс (0,17 кГр), реально достижимая доза облучения в последнем случае могла быть не более 80 кГр.

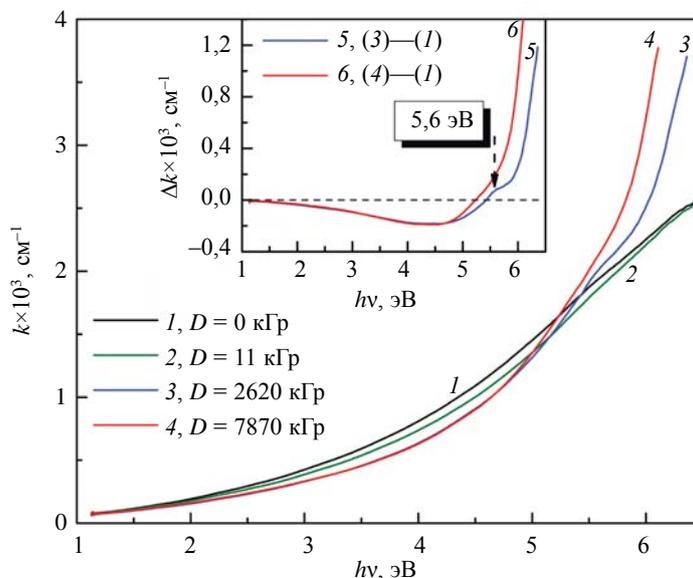


Рис. 1. Спектры оптического поглощения пленки ПТФЭ до (1) и после облучения электронами с энергией 100 кэВ дозами 11 кГр (2), 2620 кГр (3) и 7870 кГр (4). На вставке показаны разностные спектры поглощения (5, 6), полученные соответственно вычитанием из спектров, измеренных после облучения дозами 2620 кГр (3) и 7870 кГр (4), спектра поглощения пленки до облучения (1).

На рис. 2 представлены в двойных логарифмических координатах дозовые зависимости коэффициентов оптического поглощения пленок ПТФЭ в области максимального просветления вблизи 4,5 эВ при облучении электронами с энергиями 100 кэВ (1) и 10 МэВ (2). Из них следует, что с ростом дозы облучения в диапазоне 10—100 кГр наблюдается близкое и достаточно значительное просветление пленок ПТФЭ по линейному закону. При дальнейшем повышении дозы облучения

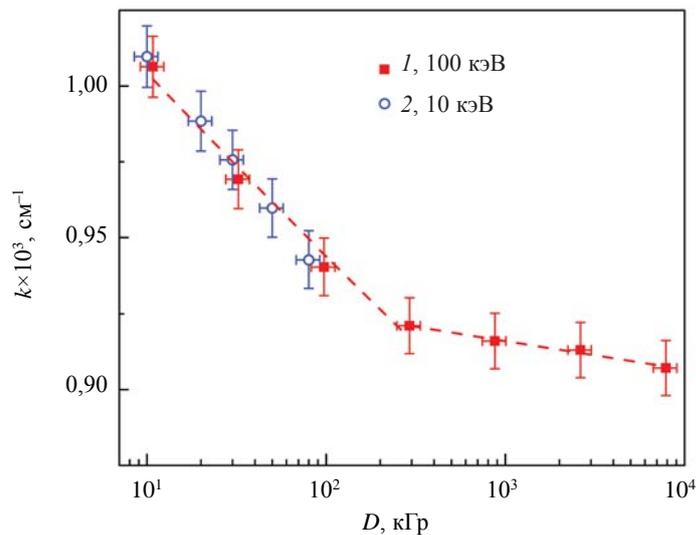


Рис. 2. Дозовые зависимости коэффициентов оптического поглощения пленок ПТФЭ, облученных электронами с энергией 100 кэВ (1) и 10 МэВ (2), в области максимального просветления при 4,5 эВ.

пучком с энергией электронов 100 кэВ скорость просветления (угол наклона) существенно снижается, а сама дозовая зависимость также может быть аппроксимирована линейной функцией.

Отличающийся характер радиационной деградации оптических свойств имеют пленки ЭТФЭ. На рис. 3 приведены спектры оптического поглощения пленки ЭТФЭ до (кривая 1) и после облучения пучком с энергией электронов 100 кэВ дозами 97 кГр (2), 292 кГр (3), 875 кГр (4), 2620 кГр (5) и 7870 кГр (6). Как видно, пленки ЭТФЭ более прозрачны в ультрафиолетовой области спектра в исходном, необлученном состоянии, чем пленки ПТФЭ (см. рис. 1). Результатом повышения дозы облучения пленок ЭТФЭ является не просветление в области 2—5 эВ, как в случае с ПТФЭ, а рост поглощения, причем с появлением четко выраженных полос с максимумами при 4,0, 4,6 и 5,5 эВ.

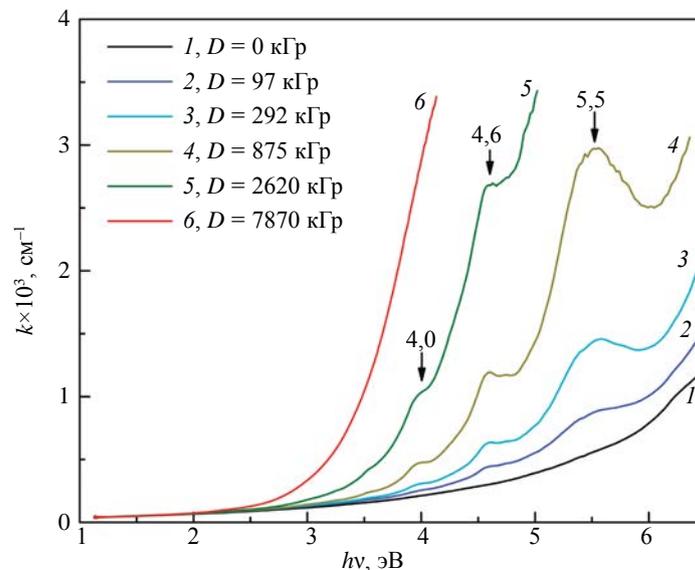


Рис. 3. Спектры оптического поглощения пленки ЭТФЭ до (1) и после облучения электронами с энергией 100 кэВ дозами 97 кГр (2), 292 кГр (3), 875 кГр (4), 2620 кГр (5), 7870 кГр (6).

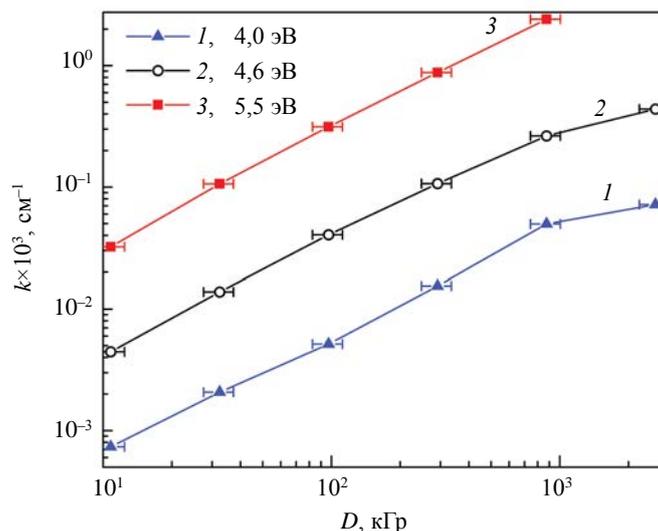


Рис. 4. Дозовые зависимости коэффициентов оптического поглощения в полосах с максимумами при 4,0 эВ (1), 4,6 эВ (2) и 5,5 эВ (3) пленок ЭТФЭ, облученных электронами с энергией 100 кэВ.

Интенсивность указанных полос увеличивается при росте дозы в диапазоне 0—2620 кГр с тенденцией насыщения при дозах выше 10 3 кГр для полос при 4,0 и 4,6 эВ (рис. 4, кривые 1—3). Обращает также внимание, что при дозе облучения 7870 кГр резко возрастает поглощение при $h\nu > 3$ эВ до недетектируемых значений оптической плотности ($D \geq 3,5$) и перестают выделяться отдельные полосы. Важно также отметить, что если облучать пленки ЭТФЭ электронами с энергией 10 МэВ, то наблюдаются близкие закономерности.

Таким образом, представленные результаты измерений спектров оптического поглощения исходных и облученных электронным пучком пленок ПТФЭ и ЭТФЭ, а также дозовых зависимостей коэффициентов поглощения пленок обоих типов, доказывают возможность использования оптической плотности пленок в качестве индивидуального критерия в способе контроля их радиационной деградации. Особенностью спектров оптического поглощения ПТФЭ, представленных на рис. 1, является «эффект просветления», заключающийся в снижении коэффициента поглощения относительно исходного образца пленки в диапазоне энергий зондирующих квантов 2—5 эВ с ростом дозы. Свидетельством сложной радиационно-стимулированной перестройки внутренней структуры пленок ПТФЭ и ЭТФЭ, разупорядочение структуры и образование свободных радикалов является появление и исчезновение отдельной полосы поглощения при 5,6 эВ с ростом дозы облучения. Эффект просветления пленок ПТФЭ и появление в пленках ПТФЭ и ЭТФЭ явно выраженных полос поглощения после облучения электронами с энергией 100 кэВ дополнительно подтвержден облучением электронами с энергией 10 МэВ линейного ускорителя электронов УЭЛР-10-10С (10 МэВ, 10 кВт, 20 мкс) центра радиационной стерилизации Уральского федерального университета.

Спектры оптического поглощения ЭТФЭ исходных пленок и облученных электронным пучком с энергией 100 кэВ существенно отличаются от спектров поглощения пленок ПТФЭ (см. рис. 3). Они более прозрачны в ультрафиолетовой области спектра в исходном, необлученном состоянии, и с ростом дозы облучения в спектре поглощения появляются три полосы при 4,0 (310 нм), 4,6 (270 нм) 5,5 (225 нм) эВ, интенсивность которых растет пропорционально дозе облучения. Дальнейшее увеличение дозы не позволяет наблюдать изменений коэффициентов поглощения в полосах с максимумами 4,0, 4,6 и 5,5 эВ, поскольку первая из них исчезает, а вторая и третья будут находиться за пределами диапазона измерений оптического поглощения, $D > 3,5$. В отличие от ПТФЭ, коэффициенты поглощения в полосах с максимумами при 4,0, 4,6 и 5,5 эВ пленок ЭТФЭ, облученных электронным пучком 100 кэВ растут синхронно с ростом дозы (см. рис. 4).

ВЫВОДЫ

Описан способ контроля радиационно-стимулированной деградации оптической плотности пленок политетрафторэтилена и их модификации, сополимера тетрафторэтилена и этилена, основанный на измерениях коэффициента оптического поглощения пленок в зависимости от дозы

электронного пучка. Полученные в работе закономерности по изменениям оптического поглощения с ростом дозы облучения дополнительно могут использоваться для решения обратной задачи, а именно для определения неизвестной дозы по радиационно-стимулированному изменению оптического поглощения. Способ может быть полезен для регламентного контроля и прогнозирования функциональных свойств пленочных изделий, работающих в экстремальных условиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1) при частичной поддержке РФФИ (проект 20-38-90239).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwarz R., Diesendruck C. Fluorinated Polymers: Synthesis and Applications / In book: PATAI'S Chemistry of Functional Groups. 2022. P. 1—22.
2. Цеентмайер С. Пленочные фторполимеры // Полимерные материалы. 2018. № 8. С. 30—38.
3. Панишин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Л.: Химия, 1978. 232 с.
4. Soggi M.C., Rodríguez G., Oliva E., Fushimi S, Takabatake K, Nagatsuka H, Felice C.J., Rodríguez A.P. Polymeric Materials, Advances and Applications in Tissue Engineering: A Review // Bioengineering. 2023. V. 10. No. 2:218. P. 1—38.
5. Скурат В.Е. Изменение интегральной степени черноты фторполимерных материалов в условиях околоземного космического пространства // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т. 17. № 3. С 1—10.
6. Angirasa D., Ayyaswamy P. Review of Evaluation Methodologies for Satellite Exterior Materials in Low Earth Orbit // Journal of Spacecraft and Rockets. 2014. V. 51. No. 3. P. 750—761.
7. Mezouar A., Saidi-Amroun N., Griseri V., Teyssedre G., Saidi M. Correlation between chemical, thermal and dielectric properties of gamma-irradiated PTFE thin films // Journal of Polymer Research. 2023. V. 30. No. 88. P. 1—11.
8. Hao L.H., Hieu D.T.T., Luan L.Q., Phuong H.T., Dinh V.P., Tuyen L.A, Hong P.T.T., Man T.V., Tap T.D. Electron and gamma irradiation-induced effects in poly(ethylene-co-tetrafluoroethylene) films // Journal of Applied Polymer Science. 2022. V. 139. I. 29, P. 1—18.
9. Zahid M.A., Kim S., Jung I.S., Kang S.H., Cho Y.H., Cho E.C., Yi J. The Influence of UV Light Exposure on the Reliability of Various Front Materials for Lightweight PV // Energies. 2022. V. 15. No. 9. 6894. P. 1—9.
10. Mohammadian-Kohol M., Asgari M., Shakur H.R. Effect of gamma irradiation on the structural, mechanical and optical properties of polytetrafluoroethylene sheet // Radiation Physics and Chemistry. 2018. V. 145. P. 11—18.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДЛЯ ДЕФЕКТОМЕТРИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

©2023г. А.В. Никитин^{1,*}, А.В. Михайлов^{1,**}, Л.В. Михайлов^{1,***},
Ю.Л. Гобов^{1,****}, В.Н.Костин^{1,*****}, Я.Г.Сморodinский^{1,*****}

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

E-mail: *an@imp.uran.ru; **mikhaylov@imp.uran.ru; ***mikhaylov_lv@imp.uran.ru;
****go@imp.uran.ru; *****kostin@imp.uran.ru; *****sm@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 17.07.2023; после доработки 29.09.2023
Принята к публикации 03.10.2023

Представлена методика приближенного решения обратной геометрической задачи магнитостатики для пластины из магнитомягкого ферромагнетика в магнитном поле как для случая расположения магнитных преобразователей непосредственно над поверхностным дефектом потери сплошности металла, так и для случая, при котором магнитные преобразователи расположены над бездефектной поверхностью пластины. Предполагается, что к пластине имеется доступ только с одной стороны. Определены размеры дефектов, в которых предлагаемая методика работает надежно. Показано, что предложенная методика может быть использована в мобильных приборах для осуществления дефектометрии буровых труб с помощью MFL (Magnetic flux leakage) метода прямо на буровых площадках.

Ключевые слова: обратная геометрическая задача магнитостатики, дефектометрия, дефекты потери сплошности металла, поверхностные дефекты, магнитное поле рассеяния дефекта, MFL-метод.

SCOPE OF APPLICABILITY OF THE TECHNIQUE FOR CONSTRUCTING MAGNETIC INDUCTION LINES FOR FLAW DEFECTOMETRY OF EXTENDED OBJECTS

A.V. Nikitin, A.V. Mikhaylov, L.V. Mikhaylov, Yu.L. Gobov, V.N. Kostin, Ya.G. Smorodinskiy

¹ Institute of Metal Physics named after M.N. Mikheev Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia
620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18

E-mail: *an@imp.uran.ru; **mikhaylov@imp.uran.ru; ***mikhaylov_lv@imp.uran.ru;
****go@imp.uran.ru; *****kostin@imp.uran.ru; *****sm@imp.uran.ru

A technique for approximate solution of the inverse geometric problem of magnetostatics for a plate made of a soft magnetic ferromagnet in a magnetic field is presented. The technique is presented both for the case of the location of magnetic transducers directly above the surface defect of loss of continuity of the metal, and for the case in which the magnetic transducers are located above the defect-free surface of the plate. It is assumed that the plate is accessible from one side only. The sizes of defects in which the proposed technique works reliably are determined. It is shown that the proposed technique can be used in mobile devices to carry out flaw detection of drill pipes using the MFL (Magnetic flux leakage) method directly at drilling sites.

Keywords: inverse geometric problem of magnetostatics, defectometry, metal loss of continuity defects, surface defects, magnetic field of defect scattering, MFL method.

DOI: 10.31857/S0130308223120060, EDN: XHIPS

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на широкое применение магнитного метода неразрушающего контроля, основанного на регистрации рассеяния магнитного потока (MFL-метод) для диагностики промышленных изделий из ферромагнетиков [1], его недостатком является то, что это индикаторный метод. Нелинейный отклик ферромагнетика на магнитное поле существенно осложняет решение обратной геометрической задачи. Этим объясняется отсутствие методик и устройств, позволяющих определять размеры и форму поверхностных дефектов с помощью MFL-метода.

Исторически решение обратной геометрической задачи магнитостатики началось с создания моделей дефектов, для которых решалась прямая задача магнитостатики [2—5]. Затем магнитостатические поля от таких эталонных дефектов сравнивались с полями, наблюдаемыми при исследовании реальных промышленных изделий. Однако вследствие множества форм дефектов и уже упомянутого нелинейного отклика ферромагнетика на намагничивающее поле, такой подход до

настоящего времени не решил задачу дефектометрии применительно к индустриальным объектам, созданным из ферромагнитных материалов.

В 2004 г. впервые для двумерного линейного случая (линейная зависимость вектора магнитной индукции от вектора напряженности магнитного поля), для конфигурации, когда датчики расположены над дефектной поверхностью, обратная задача магнитостатики была решена в работе [6]. Но для практического применения необходимо продолжить это решение на трехмерный нелинейный случай, что не так просто для предлагаемой методики. В 2019 г. была опубликована работа [7], в которой для линейного случая «получены интегродифференциальные уравнения, решения которых определяют форму намагниченного до насыщения произвольного ферромагнитного тела или полости в нем без априорного предположения о принадлежности занимаемых ими областей какому-либо конкретному геометрическому классу». В указанной работе теоретически обоснована возможность решения задачи по определению границы намагниченного до насыщения тела, выведены уравнения для функции, описывающей форму границы магнетика. Однако для практического использования данной работы требуется разработка численного алгоритма для решения этих уравнений.

В силу нелинейного отклика ферромагнетика на внешнее магнитное поле и большого разнообразия геометрических параметров дефектов пока не создано устройств, использующих нейронные сети для определения формы дефектов по результатам измерений компонент магнитного поля при MFL-методе.

В [8, 9] была впервые разработана методика, позволяющая приближенно определять форму поверхностных дефектов ферромагнитной пластины в двумерном и трехмерном случае с учетом нелинейного отклика ферромагнетика по измеренным компонентам магнитного поля, полученным методом регистрации рассеяния магнитного потока. Методика позволяет восстанавливать форму дефектов при измерении компонент магнитного поля вблизи любой поверхности пластины, т.е. вблизи поверхности с дефектом (назовем такой случай конфигурацией 2), либо вблизи бездефектной поверхности (конфигурация 1), что показано на рис. 1. В работе [10] показано, как при одностороннем доступе к пластине отличить конфигурацию 1 от конфигурации 2. Методика неприменима для определения формы трещин и трещинообразных дефектов (определение трещин и трещинообразных дефектов согласно [11]). Такая ситуация, например, реализуется для бурильных труб, где характерными дефектами тела бурильной трубы являются: износ внутренней поверхности в виде сквозных каверн, раковины на внутренней поверхности, утонение стенок трубы [12].

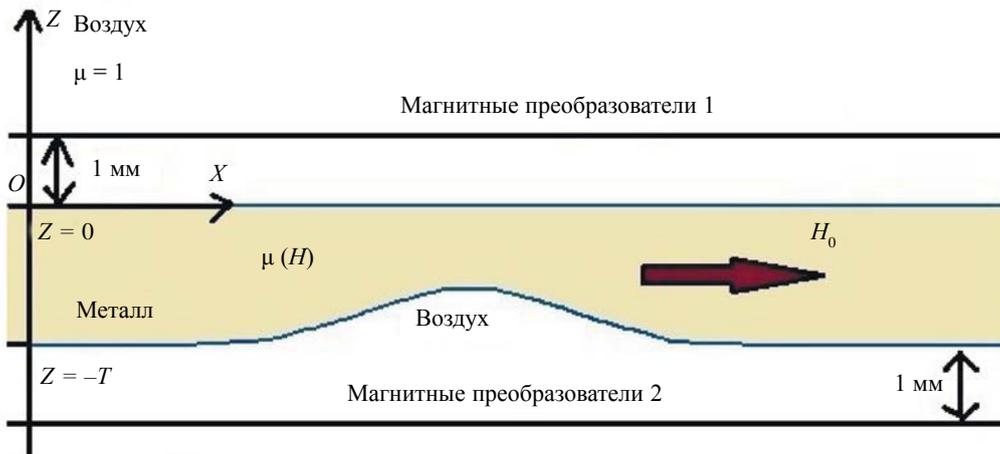


Рис. 1. Сечение пластины плоскостью, перпендикулярной прямой, вдоль которой вытянут дефект. Оси OX и OZ направлены так, как показано на рисунке, а ось OY — перпендикулярно плоскости чертежа так, чтобы все три оси образовывали правую тройку. Поле намагничивания направлено вдоль оси OX ; $\mu(H)$ — магнитная проницаемость ферромагнетика.

На рис. 1 показаны две возможные взаимные конфигурации дефекта и магнитных преобразователей при одностороннем доступе магнитных преобразователей к пластине. Дефект может находиться на противоположной от магнитных преобразователей стороне пластины (конфигурация 1,

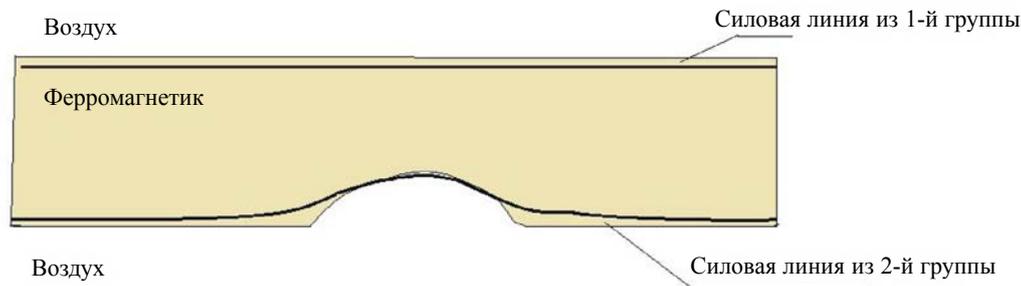


Рис. 2. Сечение пластины плоскостью, перпендикулярной прямой, вдоль которой вытянут дефект. На рисунке показана поверхность металлической пластины и рассчитанные силовые линии. Зазор между границами ферромагнетика и рассчитанными магнитными линиями выбран для наглядности. В расчетах силовая магнитная линия строится прямо по границе металл—воздух.

на рис. 1 обозначена как «магнитные преобразователи 1») и на близлежащей к магнитным преобразователям стороне пластины (конфигурация 2 на рис. 1 обозначена как «магнитные преобразователи 2»).

В случае, когда дефекты расположены на противоположной от магнитных преобразователей поверхности металлической пластины (конфигурация 1 на рис. 1), методика применяется следующим образом.

Первый этап методики. Разобьем плоскость измерений («магнитные преобразователи 1» на рис. 1) линиями, параллельными оси OX , с шагом по оси OY Δ_y , начиная от $y = -0,1$ м до $y = 0,1$ м, и линиями, параллельными оси OY с шагом по оси OX Δ_x , начиная от $x = -0,1$ м до $x = 0,1$ м. Для определенности примем $\Delta_x = \Delta_y$. В узлах получившейся сетки (i, j) измерим компоненты магнитного поля $H_x(i, j)$, $H_y(i, j)$ и $H_z(i, j)$. По этим компонентам в узлах сетки построим тангенциальные и нормальные векторы напряженности магнитного поля:

$$\mathbf{H}_{\tau,0}(i, j) = (H_x(i, j), H_y(i, j), 0)^T; \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_{n,0}(i, j) = (0, 0, H_z(i, j))^T; \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_0(i, j) = \mathbf{H}_{\tau,0}(i, j) + \mathbf{H}_{n,0}(i, j), \quad (3)$$

за положительное направление вектора нормали \mathbf{n} к поверхности металла выберем положительное направление оси OZ (см. рис. 1).

С помощью выражений сопряжения компонент магнитного поля на границе двух сред перенесем тангенциальные векторы напряженности магнитного поля из точек в воздухе в соответствующие точки в металле на границе металл—воздух. При этом нормальные векторы напряженности магнитного поля внутри металла во всех точках на бездефектной поверхности принимаются равным нулевому вектору, поскольку в ферромагнетиках после пересчета из воздуха в металл они пренебрежимо малы по сравнению с тангенциальными векторами напряженности магнитного поля. Таким образом, на начальном уровне — в точках граничной бездефектной поверхности металл—воздух внутри металла определены нормальная и тангенциальная компоненты напряженности магнитного поля, а следовательно, и их производные по тангенциальному направлению. Используем эти компоненты магнитного поля, а также их производные в качестве начальных условий уравнения Коши для восстановления магнитного поля в металле.

На втором этапе магнитное поле в металле восстанавливается с помощью решения уравнений Максвелла для случая магнитостатики от уровня начальных условий в предположении, что всюду ниже упомянутой границы также находится металл.

На третьем этапе для определения формы дефекта по границам поверхностей пластины в металле строятся 2 группы силовых магнитных линий. Силовые магнитные линии первой группы проходят вдоль границы металл—воздух на бездефектной поверхности металла. Силовые магнитные линии второй группы начинаются на противоположной поверхности металла в области, которая не содержит дефект, проходят через дефект и заканчиваются в бездефектной области (см. рис. 2). За силовые магнитные линии, по определению, магнитный поток не выходит. И в действительности, величина магнитного потока, выходящего за пределы этих рассчитанных сило-

вых линий (т.е. за пределы ферромагнетика), много меньше величины магнитного потока в металле, поэтому выходом магнитного потока даже в зоне дефекта можно пренебречь.

В случае, когда дефекты расположены на ближней к магнитным преобразователям поверхности пластины (см. конфигурация 2 на рис. 1), методика применяется как описано ниже.

Поскольку, в отличие от предыдущего случая, в зоне дефекта неизвестно расстояние от уровня измерений в воздухе до границы металла, будем считать, что построенные в точках плоскости измерений тангенциальные векторы напряженности магнитного поля являются нулевым приближением тангенциальных векторов в точках плоскости над бездефектной поверхностью металла. При этом нормальные векторы напряженности магнитного поля внутри металла в точках на бездефектной поверхности вновь принимаются равными нулевому вектору. Далее повторим три этапа, которые описаны выше.

В результате получим поверхность, которая приближенно описывает поверхность реального дефекта (силовые магнитные линии 2-й группы). В точках на получившейся поверхности сравним тангенциальные векторы, полученные в результате применения методики (обозначим их как $\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)$ — тангенциальные векторы на поверхности, содержащей дефект со стороны металла), и тангенциальные векторы, полученные в результате восстановления поля в воздухе от уровня измерений (обозначим их как $\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)$ — тангенциальные векторы на этой же поверхности со стороны воздуха), т.е. проверим, выполняется ли в точках на получившейся поверхности выражение сопряжения для тангенциальных векторов напряженности магнитного поля со стороны металла и со стороны воздуха.

Поверхность, содержащая дефект, порождена семейством силовых магнитных линий, откуда следует, что в точках, лежащих на вычисленной поверхности внутри металла, тангенциальные векторы равны векторам напряженности магнитного поля. Для длин этих векторов можем записать:

$$|\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)| = \sqrt{H_{x,m}^2(i, j) + H_{y,m}^2(i, j) + H_{z,m}^2(i, j)}. \quad (4)$$

Скалярные проекции векторов напряженности магнитного поля, полученные в результате восстановления поля в воздухе — $\mathbf{H}_a(i, j)$ на $\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)$, дадут длины векторов $\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)$:

$$|\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)| = \frac{(\mathbf{H}_a(i, j) \cdot \mathbf{H}_{\tau,m}(i, j))}{|\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)|}. \quad (5)$$

Точки вычисленной поверхности, где длины тангенциальных векторов напряженности магнитного поля $\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)$ совпадают с $\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)$, определены верно. В точках поверхности $(x_p, y_p, Z_{\text{boundi},j})$, где они не совпадают, необходимо переопределить значения тангенциальных векторов на начальном уровне, т.е. в точках $(x_p, y_p, 0)$.

Для определения величин новых начальных тангенциальных векторов в узлах сетки на границе металл—воздух со стороны металла используем следующую процедуру. В узлах сетки (i, j) рассчитаем $\kappa(i, j) = |\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j, Z_{\text{boundi},j})| / |\mathbf{H}_{\tau,0}(i, j, 0)|$ — коэффициенты изменения величин тангенциальных векторов от значения на вычисленной поверхности $\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j, Z_{\text{boundi},j})$ до начального значения $\mathbf{H}_{\tau,0}(i, j, 0)$. В узлах сетки на поверхности $(i, j, Z_{\text{boundi},j})$ вычислим разность $\Delta(i, j) = |\mathbf{H}_{\tau,a}(i, j)| - |\mathbf{H}_{\tau,m}(i, j)|$, переопределим начальные значения тангенциальных векторов следующим образом:

$$\mathbf{H}_{\tau,0}^{\text{new}}(i, j) = \mathbf{H}_{\tau,0}(i, j) + \kappa(i, j) \cdot \Delta(i, j) / 4, \quad (6)$$

где $\mathbf{H}_{\tau,0}^{\text{new}}(i, j)$ — новые значения тангенциальных векторов.

Далее, с помощью описанной ранее методики получим новую поверхность, приближенно описывающую форму дефекта. В точках получившейся поверхности сравним тангенциальные вектора, получающиеся при восстановлении поля в воздухе, и с помощью методики — в металле. В результате получим новые начальные условия для тангенциальных векторов в узлах сетки. Процесс можно повторять до тех пор, пока величины $\Delta(i, j)$ не станут достаточно малы и, следовательно, $\mathbf{H}_{\tau,0}^{\text{new}}(i, j) \approx \mathbf{H}_{\tau,0}(i, j)$, т.е. дальнейшие итерации практически перестанут изменять геометрические параметры формы дефекта. В результате получим поверхность, приближенно описывающую форму дефекта.

Для применения описанной выше методики на практике необходимо установить область размеров дефектов, в которой она надежно работает. Этой цели посвящена представленная работа. Для получения начальных условий при решении обратной геометрической задачи магнитостатики использовались решения прямой задачи с помощью программы ELMER, а также результаты натуральных экспериментов [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В численных трехмерных экспериментах начальные условия для решения обратной геометрической задачи магнитостатики были получены с помощью решения прямой задачи в программе ELMER. Толщина пластины была принята равной 10 мм ($T = 10$ мм). Величина T была выбрана такой, поскольку для магистральных труб наземных трубопроводов, бурильных и насосно-компрессорных труб значение T составляет около 10 мм. Уровень измерений 1 мм находился над поверхностью пластины как в случае конфигурации 1, так и в случае конфигурации 2 (см. рис.1). На этом уровне были получены значения компонент напряженности магнитного поля в точках, равноотстоящих на 1 мм, на площади 200×200 мм. Центр дефекта всегда находился в центре квадрата 200×200 мм.

Были получены поля для дефектов с глубинами от 2 до 5 мм с шагом 1 мм. Раскрытие дефекта составляло величины от 5×5 мм (5 мм по оси OX и 5 мм по оси OY соответственно) до 30×45 мм; с шагом по оси OX 5 мм (от 5 до 30 мм), по оси OY шаг 10 мм (от 5 до 45 мм).

В натуральных экспериментах начальные условия для обратной задачи были измерены в следующих искусственно созданных дефектах (рис. 3).

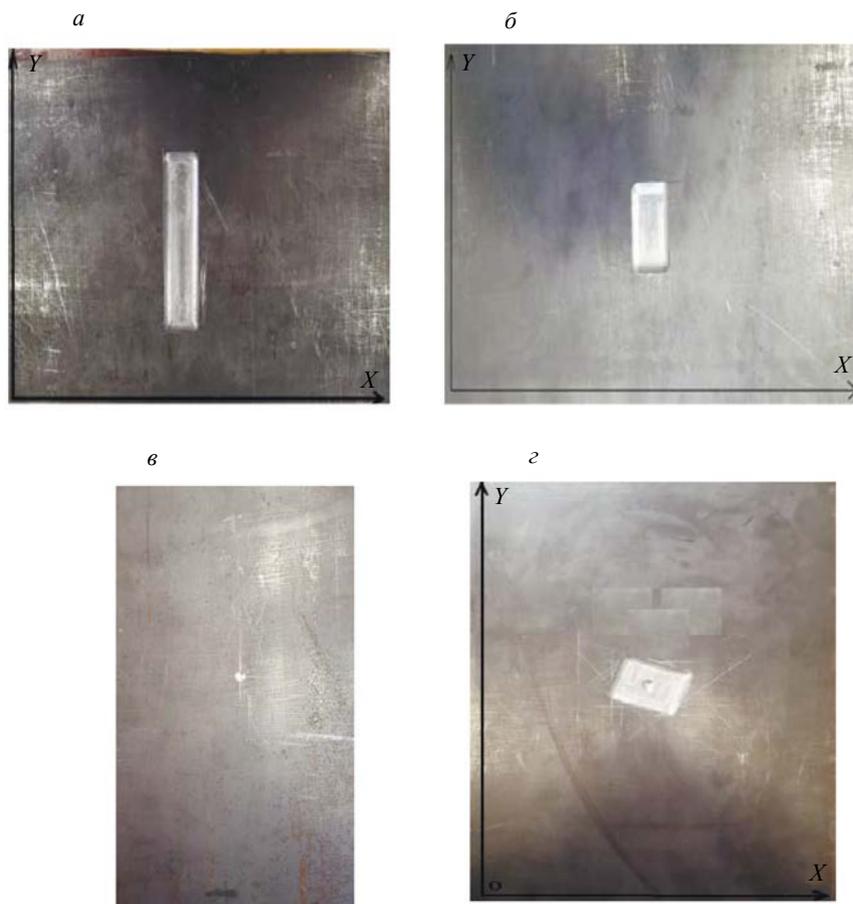


Рис. 3. Искусственные дефекты, созданные в металлических пластинах из стали 20. Размеры пластин 200×400 мм, толщина пластины $T = 10$ мм. Прямоугольные дефекты имеют сглаженные верхние края. Размеры дефектов описываются следующим образом: [размер вдоль оси OX , мм] \times [размер вдоль оси OY , мм] \times [размер вдоль оси OZ , мм]. Дефект с размерами $30 \times 100 \times 4$ мм (а); дефект с размерами $30 \times 40 \times 5$ мм (б); дефект с размерами $10 \times 10 \times 2$ мм и дефект $10 \times 10 \times 5$ мм (в); дефект расположен под углом к осям OX и OY , большая сторона дефекта 40 мм, меньшая 30 мм, площадка основной части дефекта имеет глубину 2 мм, в центре дефекта находится лунка диаметром 7 мм и глубиной 2 мм (г).

Поскольку раскрытие дефекта с хорошей точностью можно определить по измеренной топографии магнитного поля в воздухе, вблизи поверхности металла (рис. 4—7), то рассмотрим точность определения глубины дефектов с помощью предложенной методики.

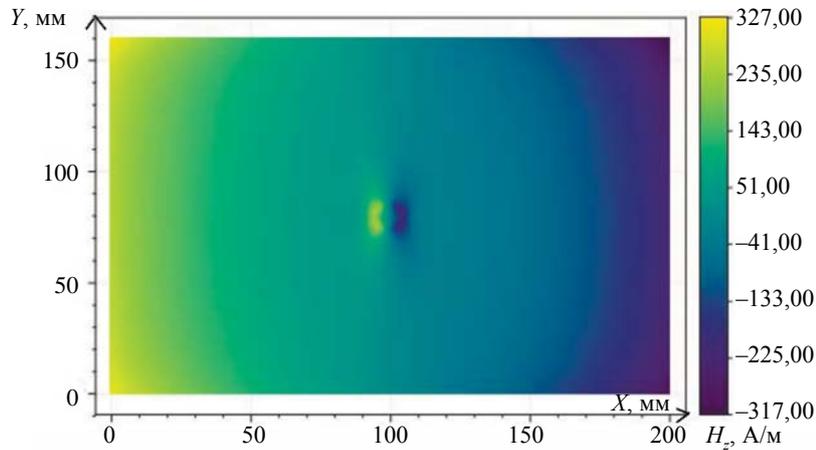


Рис. 4. Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над поверхностью с дефектом (конфигурация 2). Дефект в виде лунки, диаметр 10 мм, глубина 2 мм.

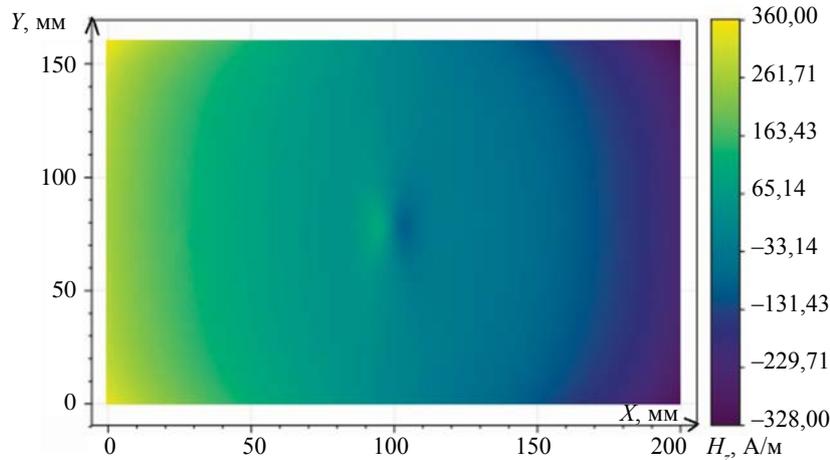


Рис. 5. Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над бездефектной поверхностью (конфигурация 1). Дефект в виде лунки, диаметр 10 мм, глубина 2 мм.

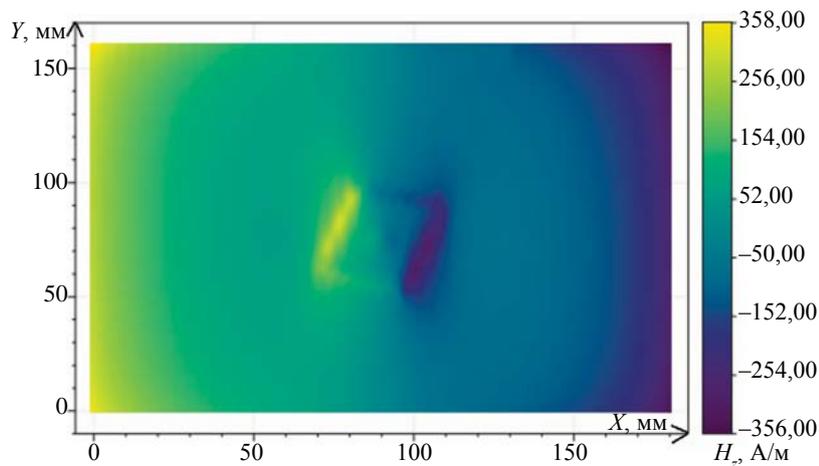


Рис. 6. Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над поверхностью с дефектом (конфигурация 2). Дефект расположен под углом к осям OX и OY , большая сторона дефекта 40 мм, меньшая 30 мм, площадка основной части дефекта имеет глубину 2 мм, в центре дефекта находится лунка диаметром 7 мм и глубиной 2 мм.

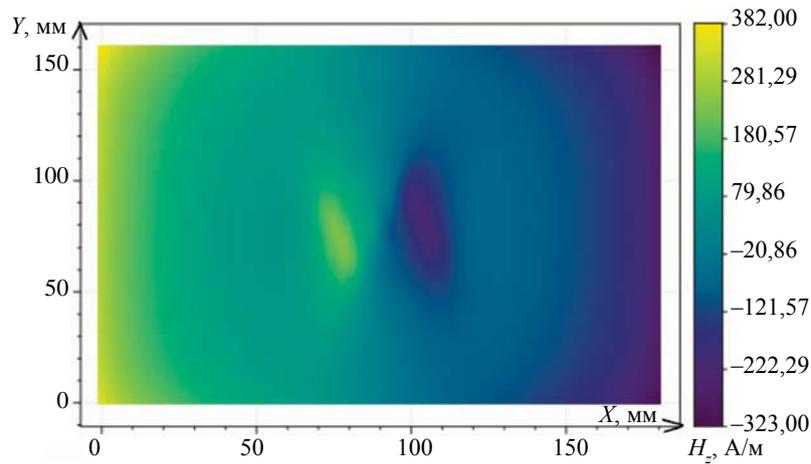


Рис. 7. Цветовая карта H_z . Измерения проведены на высоте 1 мм над бездефектной поверхностью (конфигурация 1). Дефект расположен под углом к осям OX и OY , большая сторона дефекта 40 мм, меньшая 30 мм, площадка основной части дефекта имеет глубину 2 мм, в центре дефекта находится лунка диаметром 7 мм и глубиной 2 мм.

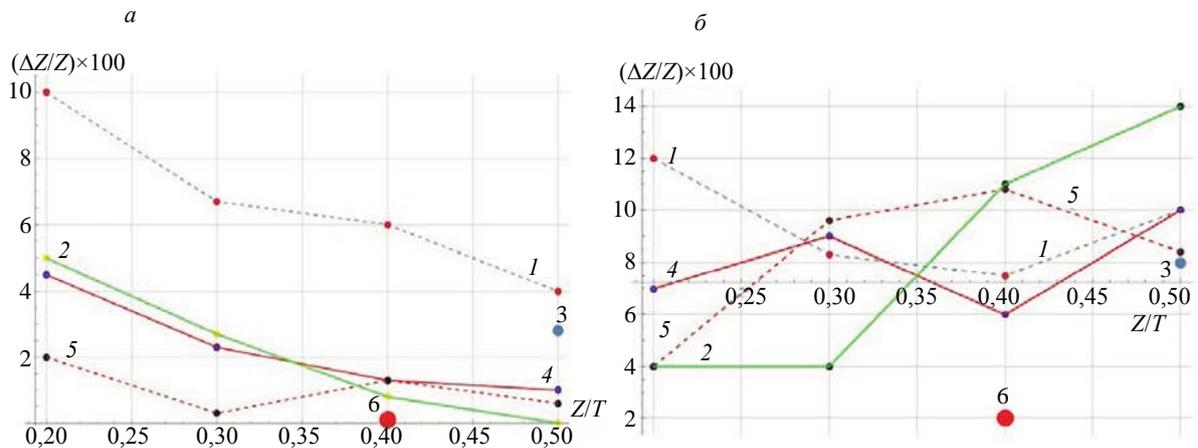


Рис. 8. Ошибка в процентах при определении глубины дефекта в зависимости от глубины дефекта для разных величин раскрытия: график для конфигурации 1 (а); для конфигурации 2 (б). Пунктирная кривая с номером 1 — соответствует дефекту с раскрытием $3T-3,5T$; сплошная кривая с номером 2 — дефекту $2T-3,5T$; точка с номером 3 — соответствует реальному дефекту $3T-4T$; сплошная кривая с номером 4 — дефекту $3T-4,5T$; пунктирная линия с номером 5 — дефекту $2T-4,5T$; точка с номером 6 — соответствует реальному дефекту $3T-10T$.

На рис. 8—10 показана ошибка определения глубин дефектов по предложенной методике в зависимости от их размеров. Ошибка рассчитанной глубины дефекта в процентах от реальной глубины дефекта определена по следующей формуле: $(|Z - Z_{\text{calc}}|/Z) \times 100$, где Z — реальный размер дефекта вдоль оси OZ , Z_{calc} — рассчитанная согласно методике глубина дефекта. Ошибка в процентах отложена по оси ординат. По оси абсцисс отложена глубина дефекта в единицах толщины пластины (Z/T). Раскрытие дефекта описывается как $L_x - L_y$, где L_x — длина дефекта вдоль оси OX в единицах T ; L_y — длина дефекта вдоль оси OY в единицах T . Начальные условия в численных и натуральных экспериментах получены для прямоугольных дефектов со сторонами вдоль OX и OY . Так же как в натуральных экспериментах, прямоугольные дефекты в численных экспериментах имеют сглаженные верхние края. Для всех дефектов справедливо неравенство $L_y \geq L_x$, т.е. рассматриваем только поперечные поверхностные дефекты потери сплошности металла.

Рис. 8 иллюстрирует тот факт, что для дефектов с раскрытием сторон $2T$ и более ошибка определения глубины по предложенной методике составляет менее 15%. Можно отметить, что ошибка определения глубины дефекта уменьшается с ростом L_y по сравнению с L_x в случае конфигурации 1.

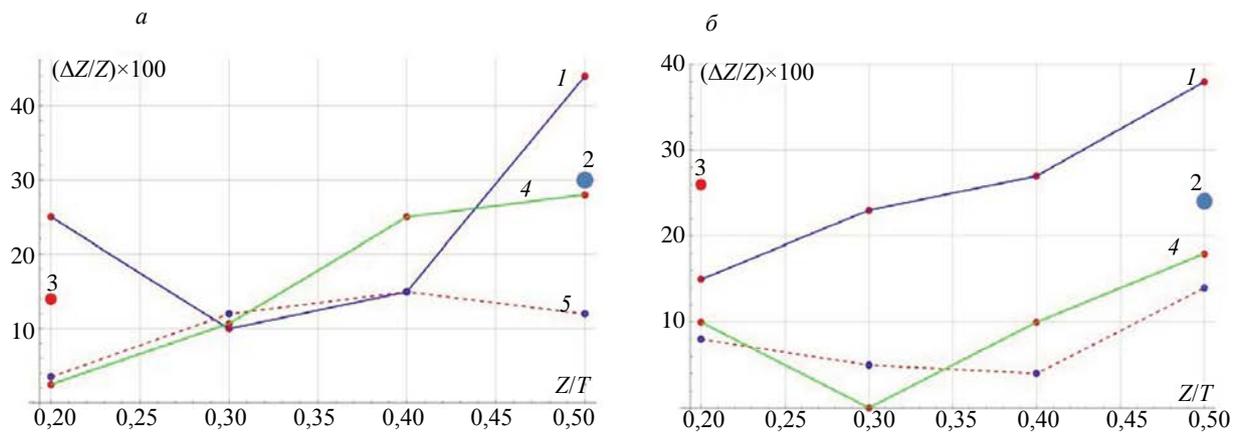


Рис. 9. Ошибка в процентах при определении глубины дефекта в зависимости от глубины дефекта для разных величин раскрытия: график для конфигурации 1 (а); для конфигурации 2 (б). Сплошная линия с номером 1 — соответствует дефекту с раскрытием $0,5T—0,5T$; точка с номером 2 и точка с номером 3 — соответствуют реальным дефектам с раскрытием $1T—1T$; сплошная линия с номером 4 — соответствует дефекту $1,5T—1,5T$; сплошная линия с номером 5 — соответствует дефекту с раскрытием $2,5T—2,5T$.

На рис. 9 показаны дефекты с равными величинами раскрытия по OX и OY ($L_x = L_y$). Для всех ошибок, превышающих 20 % на рис. 9, глубина дефекта, рассчитанная с помощью предлагаемой методики, меньше реальной глубины. Для дефектов с $L_x = L_y$ величина ошибки наибольшая — сравним с результатами на рис. 10. Однако, начиная с раскрытия $2,5T—2,5T$, величина ошибки для разных величин глубины дефекта не превышает 15 %.

Рис. 10 показывает, что даже при небольших величинах раскрытия поперечного дефекта ($0,5T—1T$ по L_x) ошибка при определении глубины дефекта меньше 20 %.

Ошибка при определении глубины несимметричного дефекта (см. рис. 3г) с помощью предложенной методики составила менее 8 % от его реальной толщины (для конфигурации 1 и для конфигурации 2), что подтверждает хорошую точность определения геометрических параметров дефекта.

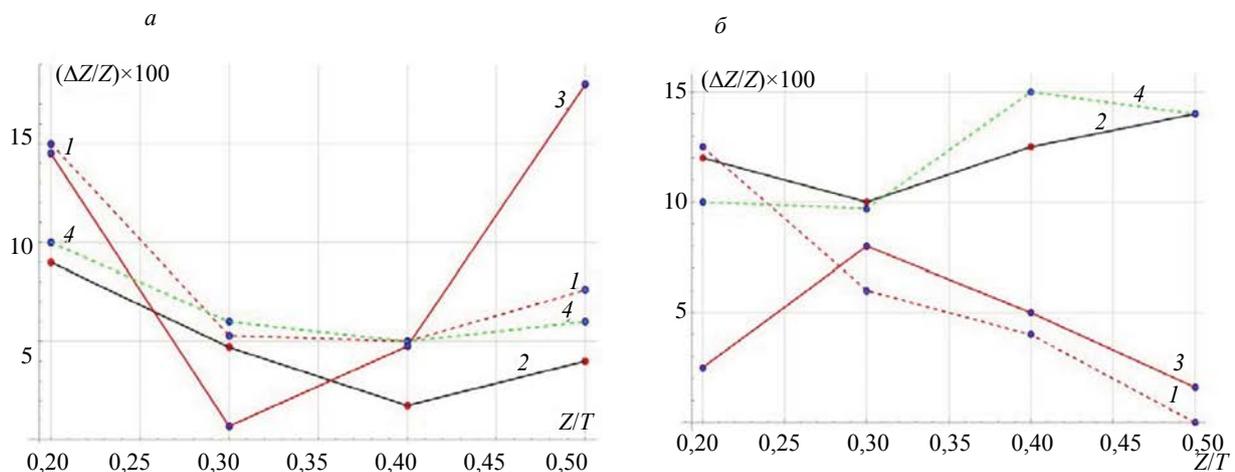


Рис. 10. Ошибка в процентах при определении глубины дефекта: график для конфигурации 1 (а); для конфигурации 2 (б). Пунктирная линия 1 — дефект $0,5T—1,5T$; сплошная линия 2 — дефект $1T—1,5T$; сплошная линия 3 — дефект $0,5T—2,5T$; пунктирная линия 4 — дефект $1T—2,5T$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведения 40 натуральных экспериментов и 240 численных экспериментов было показано, что между натуральными и численными экспериментами имеется хорошее соответствие для разных величин полей намагничивания (от 30 до 10000 А/м).

2. Если исключить из рассмотрения такие дефекты, как трещина и трещинообразные дефекты, то для типичных размеров поверхностных дефектов — каверны, раковины, утонение металлической пластины, величины раскрытия превышают $2T$, а в этом случае, с помощью описанной выше методики, геометрические параметры дефектов (топография глубин, раскрытие) определяются с ошибкой, менее 15 % от их реальных величин. Для небольших групп дефектов с раскрытием $0,5T—0,5T$ и менее, с глубиной $0,3T—0,5T$ (питтинговая коррозия) [14] можно ввести эмпирические множители для определения фактической глубины дефекта. В случае массового скопления питтинговых дефектов методика определит их как общее утонение стенки на дефектной поверхности.

3. Приведенные выше результаты показывают, что предложенная методика может быть использована в мобильных приборах для осуществления дефектометрии бурильных труб прямо на буровых площадках MFL-методом.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль / Справочник. Т. 6: В 3 кн. Кн.1. Магнитные методы контроля. Машиностроение, 2004.
2. Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов // Дефектоскопия. 1966. № 5. С. 50—59.
3. Кротов Л.Н., Шлеенков А.С., Щербинин В.Е. Компьютерное моделирование магнитных полей дефектов. Двумерная задача // Дефектоскопия. 1995. № 9. С. 27—32.
4. Кушнер А.В., Новиков В.А. Анализ моделей дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов // Вестник Белорусско-Российского Университета. 2014. № 1 (42)
5. Дякин В.В., Кудряшова О.Н., Раевский В.Я. Поле рассеяния пластины с поверхностным дефектом в однородном внешнем поле // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 22—29.
6. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. II. Постановка и метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики // Дефектоскопия. 2004. № 6. С. 36—44.
7. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Обратная задача магнитостатики в полях насыщения // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 35—44.
8. Гобов Ю.Л., Никитин А.В., Попов С.Э. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для дефектов коррозии // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 51—57.
9. Гобов Ю.Л., Никитин А.В., Попов С.Э. Решение обратной геометрической задачи магнитостатики для дефектов коррозии с учетом нелинейных свойств ферромагнетика // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 31—37.
10. Никитин А.В., Михайлов А.В., Гобов Ю.Л., Попов С.Э. Определение локализации дефекта, а также восстановление методом MFL его геометрических параметров при одностороннем доступе к ферромагнитной пластине // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2021. No. 6. P. 45—53.
11. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. 2016. <https://pipelineoperators.org/>
12. Штырев О.О. Причины разрушения тела бурильных труб при эксплуатации и преимущества бурильных труб с внутренним защитным покрытием // Территория Нефтегаз. 2014. № 12. С. 92—94.
13. Nikitin A.V., Mikhailov A.V., Smorodinskii Ya.G. Verification of a Technique for Reconstructing the Shape of Defects in Soft Magnetic Ferromagnets Using MFL Data // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 11. P. 1011—1017. [Никитин А.В., Михайлов А.В., Михайлов Л.В., Гобов Ю.Л., Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Верификация методики восстановления формы дефектов вмагнитных ферромагнетиках с использованием MFL-данных // Дефектоскопия. 2022. № 11. С. 43—49.]
14. Кайдриков Р.А., Виноградова С.С. Питтинговая коррозия металлов и многослойных систем (исследование, моделирование, прогнозирование, мониторинг) // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 4. С. 212—227.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЕЙ В МЕДИЦИНСКИХ ЦЕЛЯХ

© 2023 г. Ю.Я. Реутов¹, В.И. Пудов^{1,**}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *reutov@imp.uran.ru; **pudov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 05.10.2023; после доработки 26.10.2023
Принята к публикации 03.11.2023

Показано, что при выполнении хирургических операций по извлечению инородных металлических частиц из тела человека целесообразно использовать металлодетекторы различных типов: феррозондовые — для локализации ферромагнитных частиц, вихретоковые — для локализации неферромагнитных металлических частиц. Чувствительность медицинской аппаратуры должна быть достаточной для обнаружения мелких ферромагнитных осколков и частиц с расстояния не менее 10 мм. Показана целесообразность предварительного намагничивания постоянным магнитом области локализации инородных ферромагнитных тел. Приведены способы настройки металлодетекторов. Показана необходимость минимизации посторонних электромагнитных полей в операционном помещении.

Ключевые слова: металлические осколки, свинец, металлодетекторы, полюсоискатель, феррозонд, вихретоковый датчик.

EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF METAL DETECTORS FOR MEDICAL PURPOSES

Yu.Ya. Reutov¹, V.I. Pudov¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Sofia Kovalevskaya, st. 18, Ekaterinburg, 620108, Russia
E-mail: *reutov@imp.uran.ru, **pudov@imp.uran.ru

It is shown that when performing surgical operations to remove foreign metal particles from the human body, it is advisable to use metal detectors of various types: flux-gate detectors for localizing ferromagnetic particles, eddy current detectors for localizing non-ferromagnetic metal particles. The sensitivity of medical equipment must be sufficient to detect small ferromagnetic fragments and particles from a distance of at least 10 mm. The feasibility of preliminary magnetization of the search area with a strong permanent magnet is shown. Methods for setting up metal detectors are given. The need to minimize extraneous electromagnetic fields in the operating room is shown.

Key words: metal fragments, lead, metal detectors, pole detector, fluxgate, eddy current sensor.

DOI: 10.31857/S0130308223120072, EDN: XIMJOQ

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] рассматривается возможность применения феррозондовой аппаратуры для поиска металлических частиц в теле человека при их хирургическом извлечении. Авторы указывают, что поиск в процессе хирургической операции намагниченных металлических частиц предпочтительнее поиска по результатам просвечивания лучами Рентгена. Преимущества заключаются в простоте, дешевизне и полной безвредности процедуры как для пациента, так и для медицинского персонала.

Следует заметить, что ручные досмотровые металлодетекторы, выпускаемые в значительных количествах, успешно используются [2—9] во врачебной практике для отслеживания продвижения по пищеварительному тракту металлических предметов, заглатываемых преимущественно детьми. В подавляющем большинстве случаев эти предметы беспрепятственно продвигаются по пищеварительному тракту и металлодетекторы здесь применяются для мониторинга такого продвижения вместо небезопасного рентгеновского обследования. Достижимой в таких случаях точности локализации (десятки миллиметров) вполне достаточно.

Совсем другие требования по точности локализации предъявляются в случае применения поискового прибора для коррекции действий хирурга при хирургическом извлечении инородных металлических частиц из тела человека. Инородные частицы зачастую располагаются вблизи скопления кровеносных сосудов, нервных сплетений в труднодоступных органах человека. В этих случаях для проведения благоприятных операций необходимо применять по возможности поисковые дат-

чки малых размеров, но с высокочувствительными диагностическими параметрами. В частности, для глазной хирургии рабочий конец датчика должен быть не более 3 мм и длиной 30—50 мм. В то же время, размеры этого датчика должны обеспечивать удобство удержания его в руке, облаченной в хирургическую перчатку. Чувствительность медицинского поискового прибора должна быть достаточной для обнаружения инородного предмета с расстояния (в зависимости от размеров предмета) в 10—50 мм. Очевидно, что для выполнения таких требований необходим специализированный поисковый прибор.

ПОИСК ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОСКОЛКОВ И ЧАСТИЦ

Ферромагнитные (стальные, железные) частицы составляют не менее половины металлических частиц, оказывающихся в человеческом теле. Например, небрежно хранившиеся швейные иглы, обломки медицинского инструмента, использовавшегося в ходе хирургической операции, осколки слесарного инструмента, частицы стружки при обработке металла резанием и многое другое. Ферромагнитные частицы обладают свойством намагничиваться в естественном геомагнитном или искусственно созданном магнитном поле, вследствие чего сами создают вокруг себя магнитное поле, по которому и могут быть найдены с помощью приборов, реагирующих на постоянное магнитное поле. При этом индукция магнитного поля, создаваемого частицей, довольно резко убывает с увеличением расстояния до нее. По этой причине, перемещая чувствительный датчик магнитного поля в окрестности предполагаемого размещения магнитной частицы, по резкому возрастанию сигнала можно констатировать факт приближения к частице.

Поиск частицы по создаваемому ею магнитному полю приходится осуществлять в присутствии постоянно имеющегося в земных условиях геомагнитного поля, обладающего [10] вблизи экватора индукцией 33 микротесла, а вблизи земных полюсов и того больше — 66 микротесла. При этом индукция поля самой частицы составляет обычно не более нескольких микротесла. По этой причине, если осуществлять поиск непосредственно по измерениям индукции магнитного поля, то достаточно четкий сигнал будет получен лишь тогда, когда датчик магнитометра окажется в непосредственной близости к объекту поиска, что лишает смысла данную манипуляцию. Путь к решению этого противоречия давно известен и заключается он в использовании для поиска намагниченной частицы не индукции поля, создаваемого ею в окружающем пространстве, а пространственной неоднородности этой индукции (градиента). Дело в том, что естественное магнитное поле Земли обладает высокой степенью однородности. В средних широтах в точках на поверхности Земли, отстоящих друг от друга на километр, индукция земного поля различается [10] не более чем на 25 нанотесла (0,025 микротесла), в то время как в окрестности металлической частицы, подлежащей обнаружению (отысканию), неоднородность индукции ее поля может составлять десятки и сотни нанотесла в точках пространства, отстоящих всего на сантиметр друг от друга.

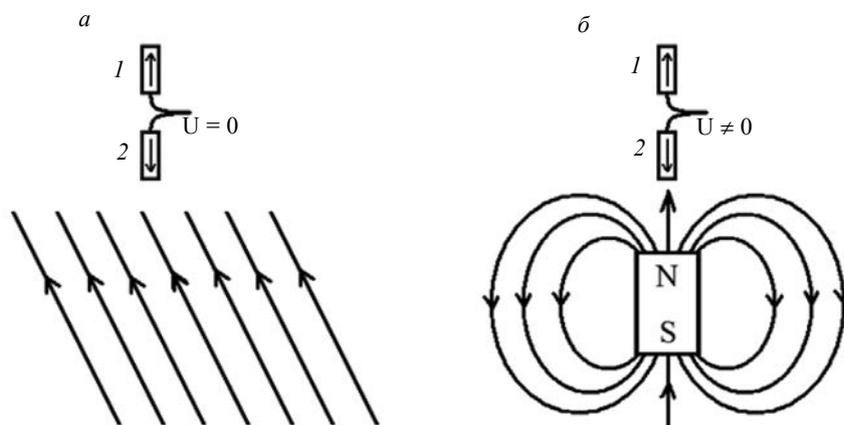


Рис. 1. Воздействие на сенсоры (1, 2) однородного геомагнитного поля (а) и неоднородного поля (б) намагниченного объекта.

Если использовать поисковый датчик, состоящий из двух жестко скрепленных идентичных сенсоров индукции магнитного поля, расположенных как показано на рис. 1, и вычитать их вы-

ходные сигналы друг из друга, то в случае помещения датчика в однородное магнитное поле (рис. 1а) мы получим на его выходе нулевое напряжение, поскольку на сенсоры будут действовать одинаковые магнитные поля.

В то же время, при расположении датчика вблизи намагниченной частицы (рис. 1б) на его сенсоры будут действовать поля с различающимися индукциями, а значит и результат взаимного вычитания их сигналов не будет равен нулю.

Из теории магнетизма следует, что с приближением к намагниченной частице возрастает не только индукция ее магнитного поля, но и неоднородность этого поля — градиент. По указанным причинам в земных условиях для поиска намагниченных частиц выгоднее использовать именно эту неоднородность (градиент), а не само поле. Градиент индукции магнитного поля принимает наибольшие значения у полюсов намагниченного металлического предмета. По этой причине приборы, применяемые нами для отыскания намагниченных частиц по неоднородности их постоянного магнитного поля, называются полюсоискателями или градиентометрами.

Известной фирмой F. FOERSTER (Reutlingen, Germany) еще в середине двадцатого века начали выпускаться полюсоискатели, предназначенные для контроля размагниченного состояния ответственных промышленных деталей и изделий. Размагниченное изделие не должно иметь на своей поверхности магнитных полюсов, в чем и позволяет убедиться его обследование полюсоискателем. Прибор фирмы FOERSTER состоял из небольшого электронного блока и соединенного с ним гибким кабелем поискового датчика, с размещенным внутри него феррозондовым преобразователем неоднородности магнитного поля в электрический сигнал. Внешне датчик представлял собой пластиковый цилиндр с наибольшим диаметром около 12 и длиной около 120 мм. Из одного торца цилиндра выходил соединительный кабель, а другим (диаметром 6 мм) датчик можно было подносить к обследуемому объекту. При приближении поискового торца датчика к полюсу намагниченной частицы стрелочный указатель прибора показывал соответствующее отклонение. Именно такая модель прибора на первых порах и была применена для поисков намагниченных металлических частиц при их хирургическом извлечении.

Важно отметить, что в работе [11] впервые было предложено предварительно намагничивать подлежащую удалению частицу кратковременным поднесением к поверхности тела пациента в месте ее предполагаемой локализации сильного постоянного магнита. Такая процедура существенно увеличивала реакцию поискового прибора на приближение датчика к частице, подлежащей извлечению, что способствовало успешности операции.

Можно указать два крайних случая ориентации вытянутой намагниченной частицы относительно поверхности человеческого тела, в котором она находится.

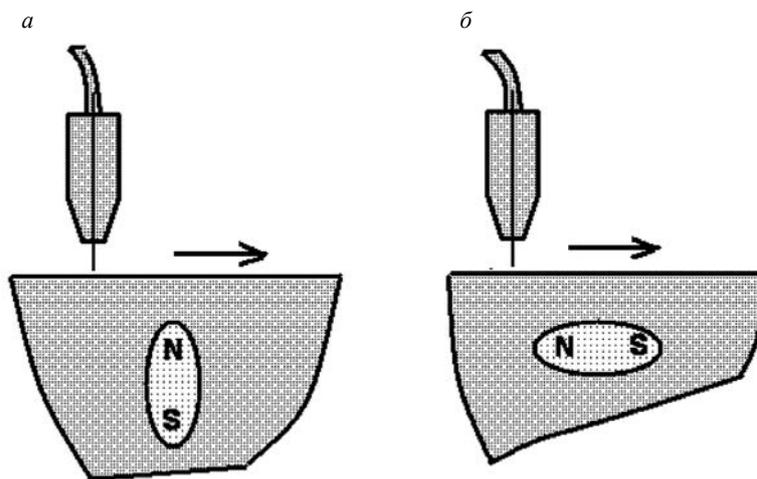


Рис. 2. Варианты ориентации намагниченной частицы относительно поверхности человеческого тела.

В первом случае (рис. 2а) частица своей длинной стороной перпендикулярна к поверхности тела, а во втором (рис. 2б) она ориентирована вдоль нее. Тогда, при поступательном перемещении поискового датчика по поверхности тела (на рис. 2 показано стрелками) получаем два возможных графика изменений показаний нашего прибора.

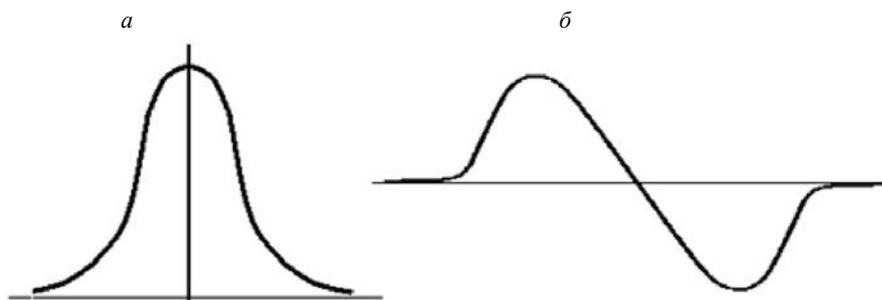


Рис. 3. Изменение показаний поискового прибора при перемещении поискового датчика вдоль поверхности человеческого тела.

В случае вертикальной ориентации намагниченной частицы это будет график, представленный на рис. 3а, а при горизонтальной, соответственно, рис. 3б. В первом случае максимум показаний поискового прибора будет наблюдаться непосредственно над верхним полюсом намагниченной частицы. Во втором же случае места наблюдения разнополярных максимумов связаны с расположением полюсов частицы не столь однозначно. Однако по мере приближения датчика к частице (заглубления в тело) положение максимумов будет все точнее приближаться к ее полюсам.

В случае промежуточной, то есть наклонной ориентации частицы (см. рис. 3б), один из максимумов будет заметно больше другого по абсолютному значению. На больший из максимумов (при отсутствии медицинских противопоказаний) и следует ориентироваться в этом случае.

Поступательно перемещая поисковый датчик вдоль поверхности тела пациента, сначала в одном направлении, а затем перпендикулярно ему, следует наметить место первоначального надреза. После неглубокого надреза следует ввести поисковый датчик (помещенный в стерильную оболочку) в него и, слегка перемещая его вдоль поверхности тела пациента, найти направление, вдоль которого показания прибора возрастают. В этом направлении и нужно корректировать дальнейшее направление разреза. Путем последовательных уточнений обязательно удастся выйти на объект поиска.

Максимальная дистанция, с которой посредством полюсоискателя можно индцировать объект поиска, ограничивается степенью совершенства изготовления поискового датчика, состоящего из двух магниточувствительных сенсоров. Дело в том, что при перемещениях датчика вдали от намагниченных частиц (объектов поиска) полюсоискатель дает ложные показания [12, 13], обусловленные воздействием на сенсоры однородного геомагнитного поля (H). Объясняется это воздействие двумя причинами (см. рис. 4 и 5).

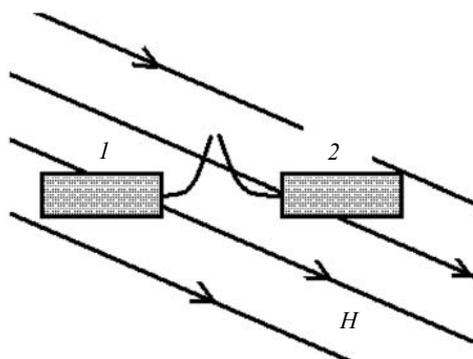


Рис. 4. Влияние неидентичности коэффициентов преобразования обмоток (катушек) сенсоров 1, 2 магнитного поля.

Во-первых, взаимно параллельные сенсоры могут иметь не полностью идентичные коэффициенты преобразования индукции поля в напряжение. В результате в идеально однородном Земном поле на выходе датчика напряжение не будет равно нулю, и его величина будет изменяться при

изменениях ориентации датчика, создавая иллюзию наличия намагниченной ферромагнитной частицы или осколка (рис. 4).

Во-вторых, пермаллоевые сердечники сенсоров могут быть не совсем параллельны друг другу (например, как показано на рис. 5) при идеальной идентичности коэффициентов преобразования. В этом случае, вдоль их осей будут действовать компоненты однородного геомагнитного поля (H), которые будут не вычитаться друг из друга, а суммироваться. При поворотах датчика вокруг продольной оси на его выходе будет наблюдаться ложное напряжение, имитирующее наличие намагниченной частицы.

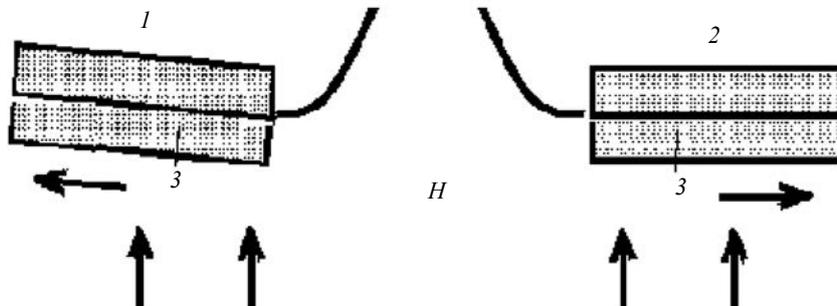


Рис. 5. Влияние взаимной непараллельности сердечников при максимальной чувствительности сенсоров датчика: 1, 2 — обмотка сенсоров; 3 — пермаллоевые сердечники.

В реальном поисковом датчике, в той или иной степени, имеют место оба указанных несовершенства, что вызывает ложные показания при его перемещениях, ограничивая дистанцию, с которой применение данной методики поиска становится оправданным. Свести к минимуму указанную погрешность можно тщательной юстировкой сенсоров в датчике, а также, перемещая поисковый датчик поступательно-параллельно самому себе и избегая его вращения вокруг продольной оси.

Из магнитостатики известно, что степень воздействия намагниченной частицы на датчик полюсоискателя приблизительно обратно пропорциональна третьей степени дистанции между ним и магниточувствительным элементом датчика [10]. Например, если дистанция увеличилась в два раза, то воздействие станет меньше в 8 раз. С другой стороны, в работе [14] показано, что при равных дистанциях ферромагнитная частица воздействует на концевой сенсор поискового датчика приблизительно пропорционально третьей степени своей длины. Отсюда следует, что если швейная игла длиной 50 мм обнаруживается полюсоискателем с расстояния 100 мм, то стальной гвоздик длиной 10 мм будет обнаружен им с расстояния приблизительно в 20 мм.

В разработках авторов в качестве датчиков магнитного поля были использованы феррозонды на основе пермаллоевых сердечников диаметром 0,1 и длиной 4—10 мм. Это позволяет уменьшить



Рис. 6. Медицинский феррозондовый полюсоискатель ПФ-05.

диаметр конца поискового датчика, вводимого в хирургический разрез, до 3—5 мм, что недостижимо при использовании современных микроэлектронных сенсоров (например, магниторезистивных или холловских).

Такие модели полюсоискателей [15, 16] позволяют обнаруживать обломок швейной иглы длиной 21 мм с расстояния 134 мм, пистолетную пулю калибра 9 мм длиной 12 мм — с расстояния 70—75 мм, стальную частицу диаметром 1 и длиной 1,8 мм — с расстояния 23—25 мм.

ПОИСК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Рассмотренный способ поиска очень удобен и чувствителен, но он применим лишь в отношении ферромагнитных частиц и предметов. К сожалению, немалый процент диагностируемых инородных частиц приходится на цветные металлы. Для их поисков применяют адаптированные для этого известные вихретоковые металлодетекторы. Заметим, что еще в 1881 году изобретатель телефона Александр Белл безуспешно пытался применить созданный им примитивный металлодетектор для облегчения поиска пули в теле двадцатого президента США Дж. Гартфилда. В последующем, более совершенные металлодетекторы с переменным успехом применялись для подобных целей. Наиболее известным в семидесятые годы прошлого столетия являлся прибор фирмы Roper Hall. Существенным недостатком этого прибора являлись большие размеры поискового датчика, что обуславливало его сложность для использования в медицинских целях.

Разработана модель вихретокового датчика (рис. 7) [17], которая позволяет более эффективно применять вихретоковую диагностическую аппаратуру в медицинских целях.

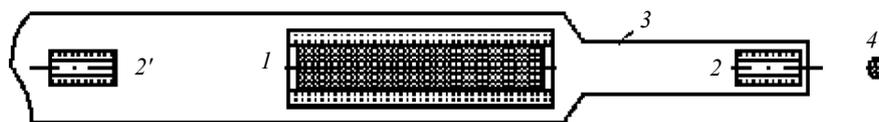


Рис. 7. Вихретоковый датчик для диагностики инородных тел из цветных металлов: 1 — намагничивающая цилиндрическая катушка с ферритовым сердечником; 2, 2' — приемные катушки; 3 — герметичный неметаллический корпус; 4 — объект поиска.

От электронного блока поискового устройства через кабель в намагничивающую катушку 1 с ферритовым сердечником подается гармонический переменный ток частотой 6—8 килогерц, в результате чего вокруг ферритового сердечника формируется переменное магнитное поле. Одинаковые приемные катушки 2 и 2', размещенные симметрично относительно ферритового сердечника, соединены последовательно-встречно и генерируемые ими, под действием намагничивающего поля, переменные напряжения в значительной степени взаимно компенсируются. В результате, при отсутствии вблизи датчика металлической частицы напряжение на его выходе близко к нулю. При появлении поблизости металлической частицы (объекта поиска) переменное магнитное поле ферритового сердечника вызывает в ней вихревые токи. Созданное этими токами переменное магнитное поле объекта поиска (поле переизлучения) воздействует на приемные катушки поискового датчика, вызывая появление на их зажимах переменных напряжений, когерентных с током в намагничивающей катушке. Благодаря тому, что приемные катушки датчика будут отстоять от объекта поиска на разных расстояниях, эти напряжения компенсируют друг друга лишь частично и на выходе поискового датчика появляется переменное напряжение полезного сигнала, являющееся мерой воздействия на датчик объекта поиска. Амплитуда этого напряжения (при прочих равных условиях) тем больше, чем ближе объект поиска к датчику. В электронном блоке поискового устройства это напряжение усиливается, отделяется от помех и, после детектирования, поступает на визуальный индикатор, показания которого тем больше, чем ближе объект поиска к торцевой части датчика. В зависимости от того, является объект поиска ферромагнитным или нет, он может усилить поле ферритового стержня в своих окрестностях или ослабить его. В результате отклонения визуального индикатора будут иметь различную полярность, что позволяет определять ферромагнитный (сталь, железо) или цветной (свинец, медь, олово, алюминий) обнаруженный материал. Это бывает важно, например, для выяснения целесообразности попыток извлечения инородного предмета из дыхательных путей ребенка посредством сильного постоянного магнита.

В работе [1] авторы уделили большое внимание выявлению варианта конструкции вихретокового датчика, обеспечивающего обнаружение инородного металлического объекта с наибольшей дистанции. Они справедливо подметили, что в случае, когда рамочные намагничивающая и приемная катушки размещаются внутри друг друга и в одной плоскости, максимальная дистанция обнаружения металлического объекта, как правило, не превышает диаметра намагничивающей катушки. Объясняется это тем, что в такой конструкции поле намагничивающей катушки в наибольшей степени воздействует на приемную, и это воздействие намного превышает поле переизлучения объекта поиска, воспринимаемое приемной катушкой, что затрудняет выделение последнего из суммарного воздействия. Выход здесь в оптимизации размещения намагничивающей катушки относительно приемной.

Указанный путь использован в поисковом датчике (см. рис. 7) [17]. Здесь намагничивающая катушка 1 длиной 28 мм и диаметром 16 мм с ферритовым сердечником 2 такой же длины отстоит от приемной катушки 3 длиной 9 мм на расстояние 30 мм (между серединами). По этой причине воздействие поля намагничивающей катушки (совместно с ферритовым сердечником) на приемную в данном случае сопоставимо с его воздействием на объект поиска, а не превышает его многократно, что облегчает выделение полезного сигнала. Благодаря этому, при внешнем диаметре приемной катушки 4 мм, pistolетная пуля калибром 9 и длиной 12 мм обнаруживается прибором [18] с расстояния 55 мм, алюминиевый шар диаметром 7 мм — с расстояния 41 мм, такой же шар диаметром 5 мм — с 26 мм, свинцовый шар (дробина) диаметром 5 мм — с 20 мм и медный стержень диаметром 3 мм и длиной 12 мм — с 26 мм.

Следует отметить ошибку, которую допустили авторы работы [1]. В предлагаемых ими датчиках приближения используются намагничивающие обмотки с длиной, существенно превышающей расстояние от ее торца до объекта поиска (на рис. 4 из [1] длина катушки составляет 80 мм). Между тем известно, что поле от кругового витка убывает пропорционально кубу расстояния до намагничиваемого объекта. По этой причине витки намагничивающей обмотки, отстоящие от объекта поиска на расстояние, в 1,5—2 раза превышающее дистанцию между ее торцом и объектом поиска, совершенно бесполезны. В нашем случае (см. рис. 7), длина обмотки мала по сравнению с расстоянием от нее до объекта поиска и вполне обоснована.

Наряду с гармоническим переменным током, в намагничивающую катушку поискового датчика можно подавать импульсный ток, как это сделано в работе [1]. В таком случае, в качестве полезного сигнала можно использовать напряжение на зажимах приемной катушки, появляющееся после выключения импульса намагничивающего тока вследствие переходных процессов в материале инородного предмета. При этом вторую приемную катушку 2' (см. рис. 4) можно исключить. Необходимо избегать применения такого способа поиска. В операционных помещениях имеется большое количество самых разнообразных электрических приборов, создающих интенсивные магнитные помехи. Поисковый прибор, использующий гармоническое намагничивающее поле, гораздо меньше восприимчив к магнитным помехам, по сравнению с использующим импульсное, что и позволяет отдать ему предпочтение, невзирая на его большую сложность.

Немаловажным является и вопрос обеспечения электробезопасности при пользовании поисковым прибором. В приборе, использующем переходный процесс (как в [1]), в момент выключения намагничивающего тока на выводах намагничивающей катушки возникает импульс напряжения в десятки и даже сотни вольт. Этот импульс присутствует в проводах, соединяющих датчик приближения с электронным блоком поискового прибора. В случае повреждения изоляции этих проводов возможно поражение электрическим током пациента или оперирующего хирурга. В приборе с использованием для намагничивания гармонического переменного тока, намагничивающая катушка настроена в резонанс с частотой тока намагничивания посредством конденсатора, соединенного с ней последовательно и размещенного в хорошо изолированном корпусе поискового щупа. По этой причине, несмотря на наличие на выводах намагничивающей катушки переменного напряжения почти в сотню вольт, на проводах, соединяющих поисковый щуп с электронным блоком, действует совершенно безопасное напряжение в несколько вольт.

В рабочем состоянии наибольшая индукция переменного магнитного поля создается катушкой поискового щупа на его цилиндрической поверхности, охватываемой рукой оперирующего хирурга. В приборе она не превышает 1 мТ, что гораздо меньше разрешенных значений.

Электрическая мощность, подводимая к поисковому щупу прибора, составляет менее 0,5 Вт и не вызывает его существенного нагрева.

В гораздо большей степени на работу прибора влияет нагрев приемной катушки 3 (см. рис. 7) при погружении конца поискового щупа в разрез тела пациента. Такой нагрев может иметь своим



Рис. 8. Вихретоковый металлоискатель для поисков в теле человека инородных частиц из цветных металлов.

следствием уход нуля поискового прибора. В устройстве такой уход компенсируется в любой момент нажатием специальной кнопки. Модель разработанного прибора представлена на рис. 8.

Во всех представленных поисковых приборах (как в полюсоискателях, так и в вихретоковых) используются два вида индикации полезного сигнала: визуальная и звуковая. Визуальная индикация применяется только аналоговая, поскольку оператору удобнее воспринимать изменение реального или виртуального отклонения, а не мелькание цифр. Цифровая индикация используется лишь как вспомогательная. Звуковая индикация осуществляется по изменению частоты щелчков, издаваемых встроенным в корпус прибора громкоговорителем. В отсутствие вблизи поискового датчика металлической частицы щелчки следуют с частотой в несколько герц, а при сильном сигнале их частота составляет 1—2 килогерца. Встроенный микрофон более удобен для оператора по сравнению с головными телефонами.

Следует отметить, что поисковый датчик вихретокового обнаружителя будет реагировать на появление вблизи него неферромагнитного металлического предмета несколько иным образом по сравнению с реакцией датчика полюсоискателя на ферромагнитные частицы (см. рис. 3). На рис. 9 показано, что если двигать вихретоковый датчик поступательно вдоль горизонтали (например, слева направо) над плоским проводящим диском, ориентированным вдоль горизонтальной плоскости (рис. 9а), то сигнал от него будет максимальным непосредственно над серединой объекта поиска. Происходит это потому, что переменное магнитное поле, создаваемое намагничивающей обмоткой щупа, вызывает в таком положении в предмете максимальные вихревые токи, поле которых в наибольшей степени воздействует на приемную катушку поискового щупа. Если же металлический диск ориентирован своей плоскостью, перпендикулярно плоскости рисунка (рис. 9б), то поле намагничивающей катушки будет вызывать в предмете максимальные вихревые токи несколько в стороне от оси симметрии щупа. Когда щуп расположен непосредственно над объектом поиска, его реакция на него минимальна. То же будет происходить, если плоский металлический диск и ось симметрии поискового щупа находятся в одной плоскости. Эти обстоятельства необходимо учитывать при пользовании вихретоковым поисковым прибором.

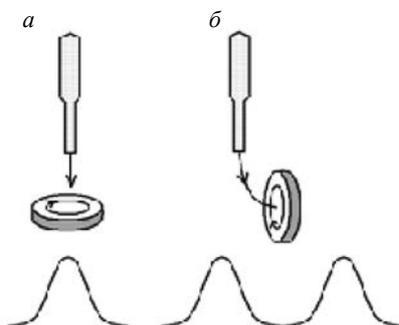


Рис. 9. Реакция прибора на перемещение поискового щупа при различных вариантах ориентации объекта поиска.

Как указывалось выше, первая попытка использования индукционного металлодетектора Александра Белла в медицине оказалась неудачной. Произошло это из-за влияния на поисковый прибор металлических деталей кровати, на которой лежал пациент. Это обстоятельство необходимо учитывать при организации подобных операций. Операционный стол должен быть неметаллическим или с использованием толстой неметаллической подстилки, а сопутствующий инструмент (зажимы, ранорасширители) также неметаллическим или из титана. В противном случае возможна неоправданная дискредитация полезного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что чувствительность применяемых металлодетекторов должна быть достаточной для обнаружения инородного металлического тела с расстояния в 10—50 мм (в зависимости от его размеров). Для повышения точности локализации инородных ферромагнитных тел необходимо проводить предварительную обработку (намагничивание) области поиска сильным постоянным магнитом. Представлены оптимальные способы настройки металлодетекторов и способы сканирования зоны поиска. Показана необходимость минимизации посторонних электромагнитных полей в операционном помещении.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mithun Sakthivel, Bobby George, Mohanasankar Sivaprakasam.* A New Inductive Proximity Sensor Based Guiding Tool to Locate Metal Shrapnel During Surgery // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. V. 63. No. 12. P. 2940—2949.
2. *Wolter J.R., Wolter K.H.* A simple and inexpensive metal detector for magnetic and nonmagnetic metallic foreign bodies // Trans. Am. Ophthalmol. Soc. 1974. No. 72. P. 363—367.
3. *Arena L., Baker S.R.* Use of a metal detector to identify ingested metallic foreign bodies // AJR Am. J. Roentgenol. 1990. No. 155. P. 803—804.
4. *Sacchetti A., Carraccio C., Lichenstein R.* Hand-held metal detector identification of ingested foreign bodies // Pediatr. Emerg. Care. 1994. No. 10. P. 204—207.
5. *Ryan J., Perez-Avila C.A., Cherukuri A., Tidey B.* Using a metal detector to locate a swallowed ring pull [case report] // J. Accid. Emerg. Med. 1995. No. 12. P. 64—65.
6. *Gooden E.A., Forte V., Papsin B.* Use of a commercially available metal detector for the localization of metallic foreign body ingestion in children // J. Otolaryngol. 2000. No. 29. P. 218—220.
7. *Younger R.M., Darrow D.H.* Handheld metal detector confirmation of radiopaque foreign bodies in the esophagus // Arch. Otolaryngol. Head. Neck. Surg. 2001. No. 127. P. 1371—1374.
8. *Muensterer O.J., Joppich I.* Identification and topographic localization of metallic foreign bodies by metal detector // J. Paediatr. Surg. 2004. No. 39. P. 1245—1248.
9. *Schalamon J.H.E., Хаджия Э.К., Ainoedhofer H., Gössler A., Schleaf J.* The use of a hand-held metal detector for localisation of ingested metallic foreign bodies — a critical investigation // Eur. J. Pediatr. 2004. No. 163. P. 257—259. DOI: 10.1007/s00431-00431-004-1401-5.
10. Магниторазведка / Справочник геофизика. Под ред. Никитского В.Е., Глебовского Ю.С. М.: Недра, 1980. 367 с.
11. *Янус Р.И., Дрожжина В.И., Веденев М.А., Реутов Ю.Я., Леман В.П.* О применении феррозондового полюсоискателя при хирургическом извлечении инородных ферромагнитных предметов // Медицинская техника. 1967. № 4. С. 55—58.
12. *Реутов Ю.Я., Литвиненко А.А.* Об эффективности борьбы с помехами путем градиентометрического соединения магниточувствительных элементов // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 76—82.
13. *Реутов Ю.Я., Пудов В.И.* О компенсации ложных сигналов градиентометрического феррозонда // Дефектоскопия. 1998. № 2. С. 18—22.
14. *Реутов Ю.Я., Щербинин В.Е., Волков А.В.* Возможности выбора преобразователей магнитного поля для дефектоскопии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 72—84.
15. *Пудов В.И., Реутов Ю.Я., Коротких С.А., Веденев М.А.* Применение универсального феррозондового полюсоискателя ПФ-1 в медицине // Медицинская техника. 1992. № 4. С. 19—22.
16. *Пудов В.И., Реутов Ю.Я., Корзунин Г.С., Коротких С.А.* Локализация инородных ферромагнитных тел с помощью феррозондового полюсоискателя ПФ-02 // Медицинская техника. 1996. № 6. С. 28—33.
17. *Литвиненко А.А., Пудов В.И., Леман В.П.* Вихретоковый локализатор инородных тел // Медицинская техника. 1992. № 1. С. 42—43.
18. *Пудов В.И., Реутов Ю.Я., Коротких С.А.* Локализация и удаление инородных металлических тел с помощью локализатора инородных тел ЛИТ-2 // Медицинская техника. 1996. № 4. С. 23—28.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ, ВИХРЕТОКОВЫМ, ВИЗУАЛЬНЫМ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2023 г. Н.В. Крысько^{1,*}, С.В. Скрынников², Н.А. Щипаков¹, Д.М. Козлов¹, А.Г. Кусый¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

² ПАО «Газпром», Россия 117997 Москва, ул. Наметкина, 16, ГСП-7

E-mail: *kryskonv@bmstu.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023; после доработки 30.10.2023

Принята к публикации 03.11.2023

Рассмотрены вопросы классификации и определения параметров поверхностных эксплуатационных дефектов по результатам ультразвукового, вихретокового и визуального и измерительного методов неразрушающего контроля. При этом визуальный и измерительный метод реализовался с применением камеры телевизионного контроля, оснащенной функцией компьютерного зрения, и лазерным триангуляционным датчиком. В работе представлен набор данных, содержащий 5760 изображений трубопроводов с питтинговой коррозией и без нее. Представлена сверточная нейронная сеть (СНС), которая была применена для классификации изображений, полученных с камеры телевизионного контроля на изображения без коррозии и изображения с питтинговой коррозией. В работе представлен набор данных, содержащий 269 измерений плоскостных и объемных поверхностных дефектов. Представлена модель определения размеров поверхностных дефектов, основанная на градиентном бустинге. В работе разработан алгоритм классификации и определения размеров поверхностных дефектов при комплексной диагностике, в котором применяются полученные модели, и определена точность работы данного алгоритма по метрике RMSE, которая вычислялась в рамках исследуемого тестового набора данных и составила 0,011 мм.

Ключевые слова: энергия, природные ресурсы, поверхностные дефекты, ультразвуковой контроль, вихретоковый контроль, передача энергии, промышленность и инновации, лазерное сканирование, комплексная диагностика, совместная оценка данных, машинное обучение, глубокое обучение, сверточные нейронные сети, оценка жизненного цикла.

CLASSIFICATION AND SIZING OF SURFACE DEFECTS OF PIPELINES BASED ON THE RESULTS OF COMPLEX DIAGNOSTICS BY ULTRASONIC, EDDY CURRENT AND VISUAL AND MEASURING METHODS OF NONDESTRUCTIVE TESTING

N.V. Krysko^{1,*}, S.V. Skrynnikov², N.A. Shchipakov¹, D.M. Kozlov¹, A.G. Kusyy¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, Baumanskaya 2nd street, building 5, building 1, Moscow, 105005, Russia

² Public Joint Stock Company Gazprom, Nametkina St., 16, GSP-7, Moscow, 117997, Russia

E-mail: *kryskonv@bmstu.ru

The issues of classification and determination of parameters of surface operational defects according to the results of ultrasonic, eddy current and visual and measuring methods of nondestructive testing are considered. At the same time, the visual and measuring method was realized with the use of a television inspection camera equipped with a computer vision function and a laser triangulation sensor. The paper presents a dataset containing 5760 images of pipelines with and without pitting corrosion. A convolutional neural network (CNN) is presented, which has been applied to classify the images obtained from a TV inspection camera into images without corrosion and images with pitting corrosion. The paper presents a dataset containing 269 measurements of planar and volumetric surface defects. A model for surface defect sizing based on gradient boosting is presented. The paper develops an algorithm for classification and sizing of surface defects in complex diagnostics, in which the obtained models are applied, and determines the accuracy of this algorithm by the RMSE metric, which was calculated within the studying test data set and amounted to 0.011 mm.

Keywords: energy, natural resources, surface defects, ultrasonic inspection, eddy current inspection, energy transfer, industry and innovation, laser scanning, complex diagnostics, data fusion evaluation, machine learning, deep learning: convolutional neural networks, life cycle assessment.

DOI: 10.31857/S0130308223120084, EDN: XIMYZL

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации активно эксплуатируется сеть трубопроводов большой протяженности. Одними из основных эксплуатационных дефектов, которые возникают под воздействием продукта или внешней среды, являются поверхностные коррозионные повреждения, а именно стресскоррозионные трещины, которые можно отнести к плоскостным дефектам, и местная коррозия (питтинги, свищи т.д.), которые относятся к объемным дефектам [1—5]. Обеспечение длительной безопасной эксплуатации данных объектов является актуальной задачей, поэтому в настоящее время необходимо развитие технологий комплексного неразрушающего контроля (НК) несколькими методами в автоматическом режиме, с выполнением классификации и определением параметров данных дефектов.

В большинстве случаев для выявления поверхностных коррозионных повреждений используют методы визуального и измерительного, магнитного, вихретокового или ультразвукового контроля [6]. В [7, 8] были рассмотрены возможности ультразвукового контроля (УК) с применением волн Рэлея по выявлению поверхностных дефектов. В [9] была исследована модель объединения данных ультразвукового и вихретокового контроля (ВК), позволяющая выполнить классификацию поверхностных дефектов. При работе данная модель основывается только на результатах УК и ВК, что может приводить к ложной классификации, например крупная питтинговая коррозия может классифицироваться как отсутствие контакта преобразователя с объектом контроля. Для исключения подобных случаев для классификации следует добавить визуальный и измерительный контроль (ВИК), поскольку он позволяет с высокой точностью идентифицировать питтинговую коррозию. Использование традиционного ВИК для исследования всей поверхности трубы нецелесообразно из-за значительной трудоемкости. Для автоматизации этого процесса используется телевизионная камера, оснащенная моделью компьютерного зрения, которая позволяет идентифицировать питтинговую коррозию на изображениях.

В большинстве существующих работ [10—17], рассматривающих использование различных моделей для телевизионного контроля, идентификация коррозии на изображениях осуществляется по цветовым признакам наличия ржавчины. Однако ржавчина и другие изменения цвета поверхности допустимы на трубопроводах, поскольку они не снижают прочностных характеристик. Поэтому в [18] была разработана модель, которая осуществляет классификацию не на основании изменения цвета, а на основании других признаков, присущих изображению с потерей металла в виде питтинговой коррозии.

Помимо задачи классификации необходимо определять размеры выявленных дефектов. В работах [7, 8, 19—22] рассмотрены возможности определения размеров поверхностных дефектов, и несмотря на то, что по отдельности методы НК позволяют оценить глубину дефектов, оценка осуществляется с определенной погрешностью, также при больших значениях глубин дефектов, точность оценки снижается. Для повышения точности определения параметров выявленных дефектов [23] была разработана модель определения размеров дефектов по результатам комплексного анализа данных УК, ВК и ВИК.

По результатам анализа литературных данных не было обнаружено алгоритма, позволяющего по результатам комплексной диагностики УК, ВК, ВИК определять тип поверхностных эксплуатационных дефектов трубопровода, а также их параметры. Существуют только отдельные модели на основе статистических методов, машинного и глубокого обучения, решающие свои узко поставленные задачи. Поэтому создание единого алгоритма анализа данных комплексной диагностики является актуальной задачей на сегодняшний день.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для создания единого алгоритма анализа данных комплексной диагностики необходимо было решить две следующие задачи. Первая задача заключалась в обеспечении выявления питтинговой коррозии при ВИК трубопровода в автоматическом режиме телевизионной камерой. Вторая — в определении размеров поверхностных дефектов по результатам УК, ВК и ВИК.

Для решения первой задачи в настоящее время в большинстве случаев используются сверточные нейронные сети (СНС). СНС имеет специальную архитектуру (рис. 1), которая позволяет ей максимально эффективно распознавать образы. СНС в настоящее время активно применяются для задач обработки изображений [24—28]. Сама идея СНС основывается на чередовании сверточных и объединяющих слоев, а структура является однонаправленной. СНС получила свое название от операции свертки, которая предполагает, что каждый фрагмент изображения будет умножен на

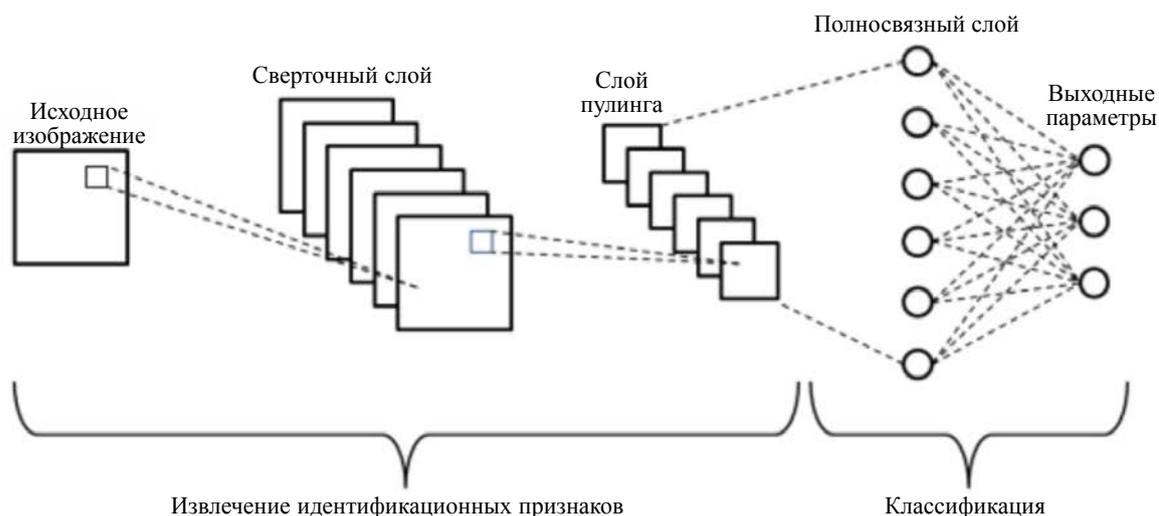


Рис. 1. Схема базовой архитектуры сверточной нейронной сети [11].

ядро свертки поэлементно, при этом полученный результат должен суммироваться и записываться в похожую позицию выходного изображения. Такая архитектура обеспечивает инвариантность распознавания относительно сдвига объекта, постепенно укрупняя «окно», на которое «смотрит» свертка, выявляя все более и более крупные структуры и паттерны в изображении [29].

На основании ZFNet, одной из наиболее используемых современных архитектур СНС, нами была разработана собственная модель, архитектура которой представлена в табл. 1.

Таблица 1

Архитектура разработанной СНС

№	Слой	Вход	Размер фильтра	Количество фильтров	Шаг	Выход	Количество параметров
1	Conv1	224×224×3	7×7×3	32	2	109×109×32	4736
2	Pool1	109×109×32	3×3×1	-	2	54×54×32	-
3	Conv2	54×54×32	7×7×32	128	2	24×24×128	200832
4	Pool2	24×24×128	3×3×1	-	2	11×11×128	-
5	Conv3	11×11×128	3×3×128	384	1	9×9×384	442752
6	Conv4	9×9×384	3×3×384	384	1	7×7×384	1327488
7	Conv5	7×7×384	3×3×384	128	1	5×5×128	442496
8	Pool3	5×5×128	3×3×1	-	2	2×2×128	-
9	GAP	2×2×128	-	-	-	128	-
10	FC	128	-	1	-	1	129

Одними из наиболее важных моментов при работе с СНС являются обучение и тестирование модели на подготовленном наборе данных. В нашем случае, когда объектом исследований является питтинговая коррозия, невозможно найти заранее подготовленный набор данных, который бы содержал как бездефектные изображения поверхности трубопроводов, так и изображения с питтинговой коррозией. Поэтому в процессе работы над этой задачей нами был подготовлен набор данных, состоящий из 5760 изображений (рис. 2) размером 224×224 пикселей, где 4270 фотографий — это фотографии без коррозии, а 1490 — фотографии с коррозией. В него вошли как фотографии с различных нефтегазовых объектов, полученные в процессе командировок, так

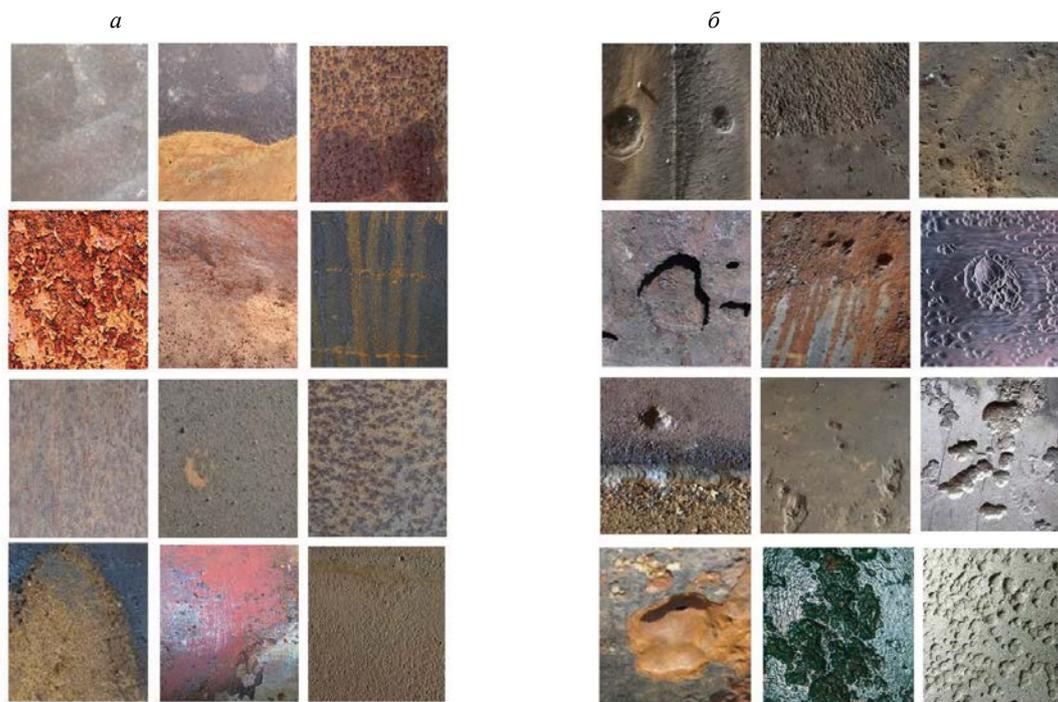


Рис. 2. Пример набора данных: изображения без коррозии (а); изображения с коррозией (б).

и фотографии из публичных банков данных, таких как <https://www.shutterstock.com> и <https://www.dreamstime.com>.

Для обучения модели СНС этот набор данных разбивался на обучающий, валидационный и тестовый наборы, содержащие 4608, 576 и 576 фотографий соответственно.

Обучение модели осуществлялось на GPU nVidia RTX 3090, батч размер составлял 64, код был разработан на языке Python 3.9 с использованием общедоступных библиотек TensorFlow (2.5.0) и OpenCV (4.5.1).

Для решения второй задачи проводилось исследование возможностей определения размеров поверхностных дефектов, которое осуществлялось на образцах (рис. 3), с изготовленными имитаторами поверхностных дефектов. Плоскостные дефекты имитировались поверхностными пазами, выполненными электроэрозионным способом, а объемные дефекты — вертикальными сверлениями.

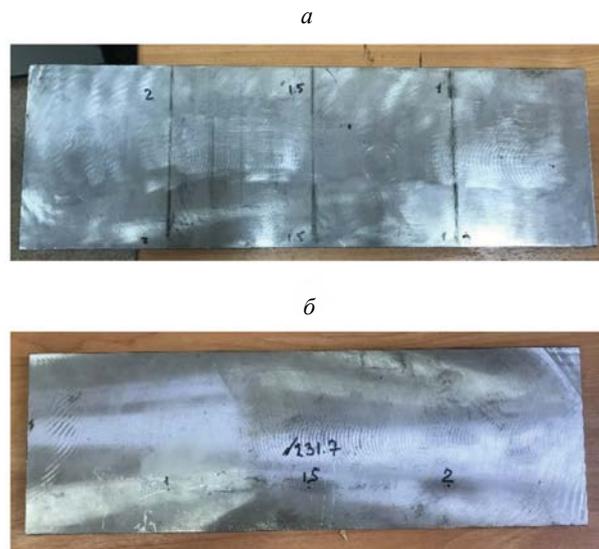


Рис. 3. Фото образцов с поверхностными дефектами: электроэрозионными пазами (а); вертикальными сверлениями (б).

В представленных образцах были изготовлены сверления глубиной 5 мм и диаметрами 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 7; 8,5; 10 мм; сверления диаметром 3 мм и глубинами 0,25; 0,4; 0,5; 0,75; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 мм; пазы раскрытием 0,15 мм и глубинами 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0 мм; пазы глубиной 0,5 мм и раскрытиями 0,15; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 мм; пазы раскрытием 0,15 мм, глубиной 0,5 мм и углами наклона к поверхности образца 15; 30; 45; 60; 75; 90°.

Измерения с помощью ультразвукового контроля производились волнами Рэлея, аналогично с работами [7, 8], генерация волн осуществлялась бесконтактным электромагнитно-акустическим преобразователем с центральной частотой 1 МГц с использованием блока дефектоскопической электроники Sonaflex [30]. В процессе измерений выполнялась фиксация максимальной амплитуды эхосигнала, отраженного от дефекта, как это представлено на рис. 4.

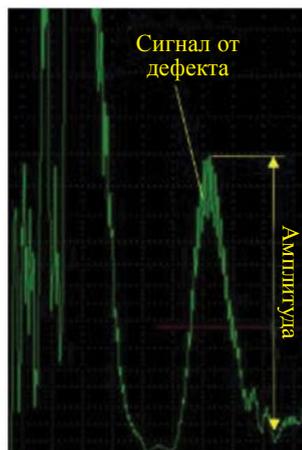


Рис. 4. Пример сигнала при ультразвуковом контроле.

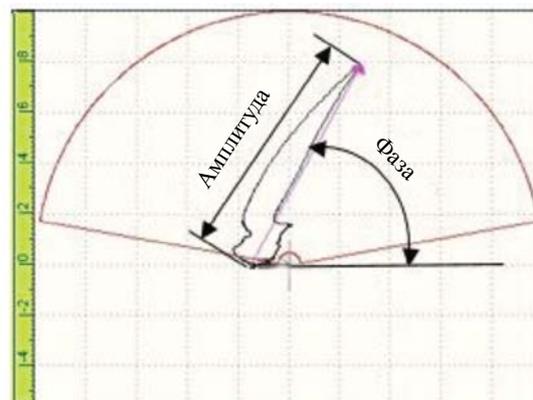


Рис. 5. Пример сигнала при вихретоковом контроле.

Вихретоковый контроль выполнялся с использованием трансформаторного дифференциального ВТП с частотным диапазоном 500 кГц—3 МГц на дефектоскопе OmniscanMX. При вихретоковом контроле регистрировалась максимальная амплитуда и фаза сигнала от дефекта, как это представлено на рис. 5.

Визуальный и измерительный контроль осуществлялся с использованием лазерного триангуляционного датчика. В результате работы этого датчика строится профиль сканируемой поверхности в виде набора координат точек. При наличии на сканируемой поверхности какого-либо дефекта на построенном профиле наблюдается локальное отклонение (рис. 6), ширину и глубину которого можно измерить.

Измерения всеми методами объединяли в один набор данных, всего было выполнено 269 измерений. Измеряемые дефекты подразделяли на два класса — плоскостные и объемные. Для плоскостных дефектов выполнялось измерение только глубины, всего для них было выполнено 149 измерений, для объемных дефектов — измерение глубины залегания и ширины раскрытия, всего для них было выполнено 120 измерений. Глубина плоскостного дефекта, глубина и ширина раскрытия объемного дефекта являются непрерывными переменными, поэтому задача определения параметров дефектов является задачей регрессии.



Рис. 6. Пример измерений лазерным триангуляционным датчиком.

В качестве модели регрессии для решения этой задачи был выбран алгоритм градиентного бустинга [31]. Градиентный бустинг использует ансамбль деревьев решений, с последовательным применением деревьев, при этом последующие деревья учатся на ошибках предыдущих. Было разработано три модели для определения параметров дефектов. Первая модель служит для определения глубины плоскостных дефектов, которая использует следующие данные: амплитуду сигналов УК и ВК и фазу ВК. Вторая — для определения глубины объемных дефектов, которая использует амплитуду сигналов УК и ВК, а также модель для определения ширины объемных дефектов, которая использует показания лазерного триангуляционного датчика и амплитуду сигнала УК. Подбор гиперпараметров моделей (табл. 2) осуществлялся автоматически случайным поиском.

Таблица 2

Гиперпараметры моделей на основе градиентного бустинга

Гиперпараметр	Плоск. Глуб.	Об. Глуб.	Об. Шир.
Количество деревьев решений	2404	915	571
Темп обучения	0,837	0,135	0,405
Максимальная глубина дерева	24	42	24
Минимальное количество выборок, для разделения узла	34	24	30
Минимальное количество образцов в листовом узле	35	9	2

Обучение и проверка работоспособности моделей осуществлялись с применением кроссвалидации, при которой проводилось 30 итераций, где все данные были разделены на 5 различных обучающих и тестовых выборок по 215 и 54 элементов соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках решения представленной выше первой задачи для анализа достоверности разработанной СНС при классификации изображений на тестовом наборе была построена матрица ошибок, представленная на рис. 7. Как видно из рис. 7, разработанная модель правильно классифицировала большинство изображений — 567 шт. При этом необходимо отметить, что этом эффективность работы СНС по точности и показателю F1 составляет 98,44 и 97,3 соответственно.

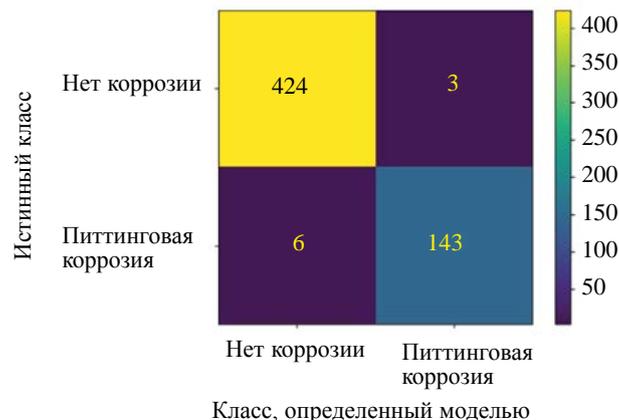


Рис. 7. Матрица ошибок классификации разработанной СНС на тестовом наборе данных.



Рис. 8. Примеры неверно предсказанных изображений без коррозии.

Ошибочно было классифицировано только 9 изображений. Ошибочная классификация может быть связана, например, с недостаточной зачисткой поверхности перед контролем и наличием на объекте контроля кусков грязи или других загрязнений. Примеры таких фотографий представлены на рис. 8.

В рамках решения второй задачи для обучения и проверки работоспособности моделей регрессии применялось 30 итераций кроссвалидации, при которой все данные, полученные при измерениях, были разделены на 5 различных обучающих и тестовых выборок, составивших 215 и 54 элемента соответственно.

Работоспособность моделей регрессии на тестовых выборках определялась по такой метрике, как корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE), которая вычисляется по формуле:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (1)$$

где n — количество наблюдений, по которым строится модель и количество прогнозов; y_i — фактические значение зависимой переменной для n -го наблюдения; \hat{y}_i — значение зависимой переменной, предсказанное моделью.

При определении RMSE вычисляются квадраты разности значений фактических параметров дефекта и параметров дефекта, предсказанных моделью для всей тестовой выборки. После чего производится их суммирование и деление на общее количество элементов тестовой выборки (в данном случае оно составляло 54 элемента). В итоге из полученного значения извлекается квадратный корень. Поскольку при кроссвалидации применялось 30 итераций, а набор данных был разделен на 5 различных частей, то в качестве итогового значения RMSE оценивалось среднее арифметическое значение RMSE, полученное от 150 обученных моделей.

Среднее значение RMSE по результатам кроссвалидации моделей для глубины плоскостных дефектов составило 0,071 мм, для глубины объемных дефектов — 0,199 мм, для ширины объемных дефектов — 0,053 мм.

На основе модели классификации с использованием СНС, модели классификации с использованием теории Демпстера—Шафера [9] и наиболее оптимальных моделей определения размеров поверхностных дефектов (которые имели наилучшие значения метрик при кроссвалидации) был создан алгоритм классификации и определения размеров, который представлен на рис. 9.

Алгоритм работает следующим образом: после проведения контроля с помощью модели классификации, основанной на теории Демпстера—Шафера [9], по амплитуде ультразвукового сигнала ($A_{ук}$), амплитуде вихретокового сигнала ($A_{вк}$) и фазе вихретокового сигнала ($\Phi_{вк}$) происходит определение типа дефекта (плоскостной дефект или объемный), после чего наличие или отсутствие объемных дефектов сопоставляется с результатом работы модели на основе СНС. Далее в случае выявления плоскостного дефекта на основании работы модели градиентного бустинга для плоскостных дефектов определяется глубина плоскостного дефекта. В случае, если выявляется объемный дефект, то его глубина и ширина определяются по соответствующим моделям градиентного бустинга.

Оценка работоспособности алгоритма проводилась по RMSE, вычисленного на тестовом наборе данных, содержащего 54 элемента. При этом итоговое значение RMSE по определению пара-



Рис. 9. Алгоритм классификации и определения размеров поверхностных дефектов.

метров дефектов с помощью алгоритма на исследуемом тестовом наборе составило 0,011 мм, при этом 70 из 78 измерений (90 %) находились в пределах одного RMSE, 73 из 78 измерений (94 %) находились в пределах двух значений RMSE.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм классификации и определения размеров поверхностных дефектов по результатам комплексной диагностики методами УК, ВК и ВИК. Классификация поверхностных дефектов по типам в алгоритме основана на совмещении двух классификаторов. Первый классификатор основан на теории Демпстера—Шафера. Второй классификатор основан на модели СНС, обученной на специально подготовленном наборе данных, состоящем из 5760 изображений, где 4270 фотографий — это фотографии без коррозии, а 1490 — фотографии с коррозией. Архитектура модели СНС представлена в настоящей статье. Определение размеров в алгоритме основано на трех регрессионных моделях на основе градиентного бустинга, обучение и тестирование которых осуществлялось на наборе данных, состоящем из 269 измерений, полученных по результатам контроля поверхностных плоскостных и объемных дефектов ультразвуковым, вихретоковым, визуальным и измерительным методами. Работоспособность алгоритма, оцененная по метрике RMSE в рамках исследуемого тестового набора данных, составила 0,011 мм, при этом 70 из 78 измерений (90 %) находились в пределах одного RMSE, 73 из 78 измерений (94 %) находились в пределах двух значений RMSE.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00524, <https://rscf.ru/project/22-29-00524/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдова Д.Г. Дефекты технологических трубопроводов: типология, оценка влияния на эксплуатацию // Промбезопасность-Приуралье. 2012. № 8. С. 24—28.
2. Ерехинский Б.А., Маслаков С.В., Шустов Н.И., Митрофанов А.В., Барышев С.Н., Заряев М.Ю., Кравцов А.В., Егоров С.В. Растрескивание металла задвижек фонтанной арматуры газодобывающих скважин северных месторождений // Территория Нефтегаз. 2014. № 2. С. 31—36.

3. Сафина И.С., Каузова П.А., Гуцин Д.А. Оценка технического состояния резервуаров вертикальных стальных // ТехНадзор. 2016. № 3 (112). С. 39—42.
4. Бутусов Д.С., Егоров С.И., Завьялов А.П., Ляпичев Д.М. Коррозионное растрескивание под напряжением газопроводов / Учебное пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. 80 с.
5. Калинин Н.П., Васильева М.А. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебно-методическое пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. С. 55.
6. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений / Учебное пособие 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2013. 576 с.
7. Алешин Н.П., Крысько Н.В., Кусый А.Г., Скрынников С.В., Могильнер Л.Ю. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 13—21.
8. Алешин Н.П., Крысько Н.В., Скрынников С.В., Кусый А.Г. Исследование выявляемости поверхностных плоскостных дефектов ультразвуковым методом с применением волн Рэлея // Дефектоскопия. 2021. № 6. С. 26—34.
9. Алешин Н.П., Скрынников С.В., Крысько Н.В., Щипаков Н.А., Кусый А.Г. Классификация поверхностных дефектов основного металла трубопроводов по результатам комплексной диагностики // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47. № 1. С. 170—178.
10. Choi K.-Y., Kim S. Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing // Corros. Sci. 2005. V. 47. No. 1. P. 1—15.
11. Medeiros F.N., Ramalho G.L., Bento M.P., Medeiros L.C. On the evaluation of texture and color features for nondestructive corrosion detection // EURASIP. J. Appl. Signal. Process. 2010. No. 1. P. 817473.
12. Khayatazad M., De Pue L., De Waele W. Detection of corrosion on steel structures using automated image processing // Developments in the Built Environment. 2020. No. 3. P. 100022.
13. Atha D.J., Jahanshahi M.R. Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection // Struct. Health. Monit. 2017. P. 1110—28.
14. Petricca L., Moss T., Figueroa G., Broen S. Corrosion detection using ai: a comparison of standard computer vision techniques and deep learning model // The Sixth International Conference on Computer Science, Engineering and Information Technology. 2016. P. 91—9.
15. Ahuja S.K., Shukla M.K., Ravulakollu K.K. Surface corrosion grade classification using convolution neural network // IJRTE. September. 2019. V. 8. Is. 3.
16. Bastiana B.T., Na J., Ranjithb S.K., Jijia C.V. Visual inspection and characterization of external corrosion in pipelines using deep neural network // NDT and E. International. 2019. 107.
17. Katsamenis I., Protopapadakis E., Doulamis A., Doulamis N., Voulodimos A. Pixel-level Corrosion Detection on Metal Constructions by Fusion of Deep Learning Semantic and Contour Segmentation. arXiv:2008.05204.
18. Krysko N.V., Schipakov N.A., Kozlov D.M., Kusyy A.G., George R. Television inspection and pitting corrosion recognition in gas pipelines using deep neural network // Construction and Building Materials — Under Review.
19. Ряховских И.В., Каверин А.А., Петухов И.Г., Липовик А.В., Селиванов А.А., Сахон А.В. Оценка размеров стресс-коррозионных дефектов при техническом диагностировании газопроводов / Научно-технический сборник: Вести газовой науки. 2020. № 2 (44). С. 1—14.
20. Шляхтенков С.П., Бехер С.А. Технология оценки глубины залегания поверхностных трещин рельсов вихретоковым методом / Политранспортные системы. XI Международная научно-техническая конференция. Новосибирск. 2020. С. 608—613.
21. Алехин С.Г., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Измерение глубины стресс-коррозионных трещин магистральных газопроводов / Научно-технический сборник: Вести газовой науки. 2022. № 1 (50). С. 78—83.
22. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 288 с.
23. Крысько Н.В., Скрынников С.В., Щипаков Н.А., Козлов Д.М., Кусый А.Г. Определение параметров поверхностных дефектов основного металла трубопроводов по результатам комплексной диагностики // Компьютерная оптика. В печати.
24. Golyak I.S., Kareva E.R., Fufurin I.L., Anfimov D.R., Scherbakova A.V., Nebritova A.O., Demkin P.P., Morozov A.N. Numerical methods of spectral analysis of multicomponent gas mixtures and human exhaled breath // Computer Optics. 2022. V. 46. No. 4. P. 650—658. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1058
25. Wang L., Liu Y., Fu L., Wang Y., Tang N. Functional Intelligence-Based Scene Recognition Scheme for MAV Environment-Adaptive Navigation // Drones. 2022. No. 6. P. 120.
26. Fufurin I., Berezhanskiy P., Golyak I., Anfimov D., Kareva E., Scherbakova A., Demkin P., Nebritova O., Morozov A. Deep Learning for Type 1 Diabetes Mellitus Diagnosis Using Infrared Quantum Cascade Laser Spectroscopy // Materials. 2022. V. 15. P. 2984.
27. Lobanova V., Slizov V., Anishchenko L. Contactless Fall Detection by Means of Multiple Bioradars and Transfer Learning // Sensors. 2022. V. 22. P. 6285.

28. *Bobkov A., Aung Kh.* Real-Time Person Identification by Video Image Based on YOLOv2 and VGG 16 Networks // Automation and Remote Control. 2022. V. 83. No. 10. P. 1567—1575.
 29. <https://center2m.ru/ai-recognition> [дата обращения 05.09.2023].
 30. SONAFLEX Multipurpose Test Electronics Unit. Source: <<https://nordinkraft.de/sonaflex/>>.
 31. *He Zhiyuan, Lin Danchen, Lau Thomas, Wu Mike.* Gradient Boosting Machine: A Survey. 2019. arXiv:1908.06951.
-



Редколлегия журнала «Дефектоскопия» поздравляет **Якова Гавриловича Смородинского** с 75-летием!

Желаем ему и его близким здоровья, успехов и благополучия!

Яков Гаврилович Смородинский — крупный специалист в области дефектоскопии и неразрушающих физических методов контроля, автор более 120 научных работ, в том числе 6 монографий и 2 патентов. Он внес существенный вклад в разработку теории распространения ультразвука в материалах со сложной неоднородной упругой и магнитной структурой. Теоретически исследовал акустические свойства трансверсально-изотропных материалов, что позволило более точно определять положение и размеры дефектов, скорости распространения упругих волн в однородной среде и, в свою очередь, обеспечить неразрушающий контроль физико-механических характеристик материала в слое, дефектоскопию и толщинометрию крупногабаритных конструкций и сооружений из металлических и композиционных материалов. Результаты его работы были успешно использованы при разработке нового поколения приборов Научно-производственного объединения «Интротест». Высокую значимость имеют разработанная Яковым Гавриловичем структура комплексной линии скоростного неразрушающего контроля железнодорожных колес в процессе производства, а также созданные для указанной линии установки иммерсионного ультразвукового контроля с уникальными параметрами, которые внедрены на «Евраз Нижнетагильский металлургический комбинат». В сотрудничестве с МГТУ имени Баумана им разработана и практически реализована система электромагнитно-акустического контроля объектов нефтяного и газового трубопроводного транспорта, создан импульсный вариант без применения мощных постоянных магнитов.

Смородинский Яков Гаврилович ведет большую научно-организационную работу. Он председатель секции Научного совета по физике конденсированных сред Российской академии наук. Входит в состав технических комитетов Росстандарта: ТК-371 по метрологии неразрушающего контроля и ТК-364 по сварке, принимал активное участие в разработке и экспертизе более 27 ГОСТов. Как заместитель председателя Национального аттестационного комитета по неразрушающему контролю являлся одним из организаторов российской системы сертификации специалистов неразрушающего контроля. Смородинский Яков Гаврилович — вице-президент Национальной

ассоциации контроля сварки и Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике, сопредседатель Совета по сварке Союза оборонных предприятий Свердловской области. Руководит центром оценки квалификаций по сварке и родственным технологиям и аттестационными центрами по сварке и неразрушающему контролю в системе Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Он заместитель главного редактора журнала «Дефектоскопия» («Russian Journal of Nondestructive Testing»), ведущего в России журнала в области неразрушающего контроля, член редакционной коллегии журнала «Сварка и диагностика», председатель оргкомитета Уральской конференции с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», организуемой и проводимой Институтом физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, член организационных комитетов ряда престижных национальных и международных конференций. С 2016 по 2022 годы являлся членом экспертного совета Высшей аттестационной комиссии по машиностроению.

Научную и научно-организационную работу Яков Гаврилович Смородинский успешно сочетает с педагогической. С 1991 года он является сотрудником базовой кафедры «Физические методы и приборы контроля», с 2008 года — профессор Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Разработал и читал курс лекций по вихретоковому контролю, руководил курсовым и дипломным проектированием, руководит подготовкой магистерских диссертаций.

В 2004 году Яков Гаврилович Смородинский удостоен звания лауреата премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за цикл работ по качеству железобетонных конструкций. В 2021 году награжден Почетной грамотой Главы Екатеринбурга.

За успешную плодотворную научную деятельность, выдающийся вклад в организацию и развитие исследований в области неразрушающего контроля и дефектоскопии Яков Гаврилович Смородинский достоин награждения медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени.